

**VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky**

Návrh ochran a jištění v rozvodně Dolu Darkov

Proposal for protection in the substation Mine Darkov

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Martin Šmída**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Návrh ochran a jištění v rozvodně Dolu Darkov**
Proposal for protection in the substation Mine Darkov

Zásady pro vypracování:

1. Teoretický rozbor ochran a jištění se zaměřením na motory vn a transformátory
2. Teoretický rozbor výpočtu zkratových proudů
3. Popis rozvodny a současného stavu chránění
4. Návrh modernizace ochran motorů vn a napájecích transformátorů, nastavení ochran
5. Zhodnocení modernizace ochran

Seznam doporučené odborné literatury:

1. Janíček, F., Chladný, V. a kol.: Digitální ochrany v elektrizační soustavě. STU Bratislava, 2004.
2. Hradílek, Z.: Elektroenergetika distribučních a průmyslových sítí. Montanex, Ostrava, 2008.
3. Dohnálek, P.: Ochrany pro průmysl a energetiku. SNTL, Praha 1991.
4. Haluzík, E.: Ochrany a automatiky v elektrických sítích. Skriptum VUT Brno, 1985.
5. ČSN EN 60909-0. Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách. Květen 2002.
6. ČSN 33 3051. Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení. Listopad 1992.
7. Firemní literatura a katalogy, technická dokumentace.

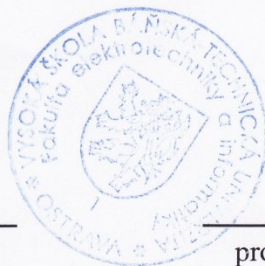
Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Zdeněk Medvec**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2015

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry

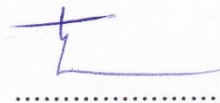


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně a uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne 6.5.2015



.....
Podpis

Děkuji tímto vedoucímu diplomové práce panu doc. Dr. Ing. Zdenkovi Medvecovi a pracovníkům elektro úpravny Darkov panu Ing. Janu Nytrovi a panu Pavlu Durczokovi za cenné rady a užitečné připomínky.

Abstrakt

Cílem práce je výpočet aktuálních zkratových poměrů na rozvodně R22 *kV* a navrhnutí částečného zmodernizování elektrických ochran pro tuto rozvodnu. Začátek úvodní části je věnován popisu možných poruchových stavů v ES a základním pojmům z teorie ochrany. Dále jsou probrány možnosti chránění vn asynchronních motorů a vn transformátorů. V druhé části je uveden teoretický rozbor výpočtů zkratových poměrů dle normy ČSN EN 60 909-0. Třetí část diplomové práce je zaměřena na popis napájení rozvodny R22 *kV* na ÚK a na popis současného stavu chránění. Dále jsou uvedena technická data nutná k výpočtům zkratových poměrů a k výpočtům nastavení jednotlivých ochranných funkcí navržených terminálů chránění RET 543 a REF 542plus. Na tuto část už pak navazuje samotný výpočet zkratových poměrů na rozvodně R22 *kV* a návrh nových elektrických ochran. V poslední části diplomové práce jsem se věnoval problematice vzniku spínacích přepětí při vypínání indukčních proudů motorů vakuovými vypínači v rozváděči R61 6 *kV*.

Klíčová slova

Elektrická ochrana, přepětí, přechodné zotavené napětí, přepětíová ochrana, vakuový vypínač, zkrat, zkratový proud, zkratová impedance

Abstract

The aim is to calculate the actual short-circuit conditions on the R22 kV substation and propose partial modernization of electrical protection for switching station. Beginning first part is devoted to a description of possible fault conditions in the EC and the basic concepts of the theory of protection. Further options are discussed protecting HV asynchronous motors and HV transformers. The second part is the theoretical analysis calculations of short-circuit conditions according to DIN EN 60 909-0. The third part of the thesis is focused on the description of the power for switching station R22 kV on ÚK and to describe the current state of protection. Furthermore, the technical data necessary to calculate short-circuit conditions and the calculations setting the individual protective features designed terminals protection RET 543 and REF 542plus. On this part it is then followed by short-circuit conditions, calculating the R22 kV substation and design of new electric protections. In the last part of the thesis I dealt with the issue of creation of switching surges while switching inductive motor currents vacuum circuit breakers in the switchgear 6 kV R61.

Key words

Electrical protection, overvoltage, transient recovery voltage, surge protection, vacuum circuit breaker, short-circuit, short-circuit current, short-circuit impedance

Seznam použitých symbolů a zkratk

ES	elektrizační soustava [-]
Q	síťový napáječ [-]
eM	skupina ekvivalentních motorů [-]
t_r	jmenovitý převod transformátoru [-]
L	fázový vodič [-]
F	místo zkratu [-]
I	elektrický proud [A]
I_n	jmenovitý elektrický proud [A]
I_{rT}	jm. proud transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí [V]
I_{rM}	jm. proud motoru [A]
I_{LR} / I_{rM}	poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru při zabržděném motoru [-]
U	elektrické napětí [V]
U_n	jmenovité elektrické napětí [V]
U_{nQ}	jmenovité napětí soustavy v bodě připojení Q [V]
U_{rT}	jm. napětí transformátoru na straně vyššího nebo nižšího napětí [V]
U_{rM}	jm. napětí motoru [V]
u_{kr}	jmenovité napětí transformátoru nakrátko [%]
u_{Rr}	činná složka jmenovitého napětí transformátoru nakrátko [%]
Z	zkratová impedance [Ω]
Z_W	zkratová impedance kabelu [Ω]
Z_Q	zkratová impedance síťového napáječe [Ω]
Z_T	zkratová impedance dvouvínutového transformátoru [Ω]
Z_M	zkratová impedance motoru [Ω]
R_T	rezistance dvouvínutového transformátoru [Ω]
R_{L20}	rezistance vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20 °C [Ω]
R_L	rezistance vedení (venkovních vedení a kabelů) při nejvyšší provozní teplotě [Ω]
R_M	rezistance motoru [Ω]
X_T	reaktance dvouvínutového transformátoru [Ω]
X_M	reaktance motoru [Ω]
x_T	poměrná reaktance transformátoru
f	kmitočet sítě [Hz]
I_k''	počáteční souměrný rázový zkratový proud [A]
$I_{k\min}''$	minimální počáteční souměrný rázový zkratový proud [A]
$I_{k\max}''$	maximální počáteční souměrný rázový zkratový proud [A]
I_{kQ}''	počáteční souměrný rázový zkratový proud v místě připojení Q [A]
S_k''	počáteční souměrný rázový zkratový výkon [VA]
$S_{k\min}''$	minimální rázový zkratový výkon [VA]
$S_{k\max}''$	maximální rázový zkratový výkon [VA]
S_{rT}	jmenovitý zdánlivý výkon transformátoru [VA]

S_{rM}	jmenovitý zdánlivý příkon motoru [W]
P_{rM}	jmenovitý činný výkon motoru nebo skupiny motorů [W]
P_{krT}	jmenovité ztráty nakrátko transformátoru [W]
$i_{d.c.}$	stejnoseměrná aperiodická složka zkratového proudu
i_p	nárazový zkratový proud [A]
I_k	ustálený zkratový proud [A]
U_n	jmenovité napětí sítě [V]
c	napěťový součinitel [-]
c_{min}	napěťový součinitel pro výpočet minimálních zkratových proudů [-]
c_{max}	napěťový součinitel pro výpočet maximálních zkratových proudů [-]
Z_k	zkratová impedance [Ω]
$Z_{k\ min}$	minimální hodnota zkratové impedance [Ω]
$Z_{k\ max}$	maximální hodnota zkratové impedance [Ω]
$Z_{(1)}$	sousledná zkratová impedance [Ω]
$Z_{(2)}$	zpětná zkratová impedance [Ω]
$Z_{(0)}$	netočivá zkratová impedance [Ω]
t_{min}	minimální doba vypnutí [s]
t_{vyp}	celková doba vypnutí výkonového vypínače [s]
t_{ochr}	celková doba vybavení ochrany [s]
TRV	přechodné zotavené napětí na kontaktech vypínače
I_{th}	ekvivalentní oteplovací proud [A]
K	korekční součinitel pro zkratové impedance dvouvinutých transformátorů [-]
k_e	koeficient pro výpočet ekvivalentního oteplovacího proudu [-]
κ	součinitel pro výpočet nárazového zkratového proudu
m	součinitel časově závislého tepelného účinku ss složky zkratového proudu [-]
n	součinitel časově závislého tepelného účinku stř. složky zkratového proudu [-]

dolní indexy:

(0)	netočivá složka
(1)	sousledná složka
(2)	zpětná složka
k_1	hodnota zkratového proudu u jednofázového zkratu
k_2	hodnota zkratového proudu u dvoufázového zkratu
k_3	hodnota zkratového proudu u trojfázového zkratu
F1, F2, F3	označení místa zkratu
T	transformátor
M	asynchronní motor nebo skupina asynchronních motorů
HV	označení vinutí vyššího napětí transformátoru
LV	označení vinutí nižšího napětí transformátoru
K	impedance nebo reaktance vypočítané s impedančním korekčním součinitelem K_G , K_T , K_S nebo K_{SO}

Obsah

Úvod.....	1
1. Teoretický rozbor ochran a jištění se zaměřením na motory vn a transformátory	3
1.1. Popis poruchových stavů v elektrizační soustavě.....	3
1.2. Základní pojmy z teorie ochran a jištění.....	6
1.2.1. Třídění ochran	7
1.2.2. Základní požadavky kladené na ochrany.....	9
1.2.3. Základní členy ochran.....	10
1.2.4. Informace a technická data pro výběr ochrany a výpočet jejího nastavení	11
1.3. Měřicí zařízení pro ochrany	14
1.4. Chránění asynchronních motorů vn	16
1.4.1. Tepelná ochrana.....	16
1.4.2. Ochrana rozběhu motoru.....	20
1.4.3. Ochrana proti opakovaným startům (ochrana neukončené sekvence).....	20
1.4.4. Zkratová ochrana.....	21
1.4.5. Zemní ochrana.....	21
1.4.6. Ochrana při nesymetrii.....	22
1.4.7. Podpěťová ochrana	22
1.4.8. Podproudová ochrana	23
1.4.9. Diferenciální (rozdílová) ochrana	23
1.4.10. Požadavky na ochrany asynchronních motorů z pohledu ČSN 33 3051	23
1.5. Ochrany transformátorů vn	24
1.5.1. Rozdílová ochrana	25
1.5.2. Zemní ochrana.....	27
1.5.3. Ochrana při přetížení transformátoru.....	29
1.5.4. Tepelná funkce	29
1.5.5. Proudová zkratová ochrana	29
1.5.6. Srovnávací ochrana	30
1.5.7. Plynové relé.....	30
1.5.8. Nádobová (kostrová) ochrana.....	30
1.5.9. Digitální ochrana třífázového transformátoru	31
1.5.10. Požadavky na ochrany síťových transformátorů z pohledu ČSN 33 3051.....	32
2. Teoretický rozbor výpočtu zkratových proudů.....	33

2.1 Předpoklady a postup pro výpočet.....	33
2.2 Zkratové impedance elektrických zařízení	34
2.2.1 Všeobecné předpoklady.....	34
2.2.2 Síťové napáječe	35
2.2.3 Transformátory	35
2.2.4 Venkovní vedení a kabely.....	37
2.2.5 Reaktory omezující zkratový proud.....	38
2.2.6 Synchronní generátory	38
2.2.7 Asynchronní motory.....	38
2.3 Výpočet zkratových proudů.....	39
2.3.1 Definice základních pojmů	39
2.3.2 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''	41
2.3.3 Nárazový zkratový proud i_p	41
2.3.4 Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th}	42
3. Popis rozvodny R22 kV a napájení ÚK na lokalitě Dolu Darkov	44
3.1 Napájení rozvodny R22 kV na úpravárenském komplexu Dolu Darkov	44
3.2 Popis rozvodny R22 kV	44
3.2.1 Způsob měření.....	45
3.2.2 Výzbroj skříní.....	45
3.3 Popis současného stavu chránění	46
3.3.1 Vypínače	46
3.3.2 Ochrany	48
4. Technická data pro výpočty	51
4.1 Hlavní povrchová rozvodna 110/22/6 kV, část „ R22/6 kV Darkov 2 – ÚZ “	51
4.2 Rozvodna R22 kV v objektu budovy prádla.....	52
4.3 Rozváděč R61 na rozvodně R22 kV	54
4.4 Štítkové a katalogové údaje.....	56
4.4.1 Parametry dvouvinutových transformátorů	56
4.4.2 Parametry kabelů	56
4.4.3 Parametry motorů vn	57
4.4.4 Parametry skupin ekvivalentních motorů nn 500V	57
5. Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R22 kV	58
5.1 Sestavení výchozích náhradních schémat.....	60

5.1.1 Náhradní schéma č.1 pro výpočet max. 3-f zkratu v místě F2	60
5.1.2 Náhradní schéma č.1 pro výpočet max. 3-f zkratu v místě F1	61
5.2 Výpočet zkratových impedancí jednotlivých prvků soustavy	62
5.2.1 Síťový napáječ „ Q “ (nadřazená soustava - rozvodna HR22 kV).....	62
5.2.2 Kebely vn „ W1 – W35 “	62
5.2.3 Dvouvinuťové transformátory „ T1 až T1-508 “	64
5.2.4 Ekvivalentní motory skupin motorů nn 500 V.....	66
5.2.5 Asynchronní motory vn 6 kV	67
5.3 Výpočet zkratových proudů I''_{k3max} , I''_{k2min} , i_{p3} , I_{th}	68
5.3.1 Výpočet zkratových proudů $I''_{k3max F2}$, $i_{p3 F2}$, $I_{th F2}$ v místě zkratu F2.....	69
5.3.2 Výpočet minimálního zkratového proudu $I''_{k2min F2}$ v místě zkratu F2.....	72
5.3.3 Výpočet zkratových proudů $I''_{k3max F1}$, $i_{p3 F1}$, $I_{th F1}$ v místě zkratu F1.....	74
5.3.4 Výpočet minimálního zkratového proudu $I''_{k2min F1}$ v místě zkratu F1	77
5.3.5 Výpočet zkratových proudů $I''_{k3 F3}$, $i_{p3 F3}$ v místě zkratu F3	78
5.3.6 Výsledky výpočtů zkratových poměrů na rozvodně R22 kV.....	79
6. Návrh nových elektrických ochran.....	80
6.1 Popis navrhovaných elektrických ochran	81
6.1.1 Terminál transformátoru ABB RET 54_	81
6.1.2 Terminál vývodového pole ABB REF 542plus	83
6.2 Výpočet nastavení funkcí ochrany RET 543 pro transformátory T7, T8	85
6.2.1 Výpočet I_{dov} kabelů W7 a W14	86
6.2.2 Výpočet nastavení nadproudových funkcí ochrany transformátoru RET 543	86
6.2.2.1 Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti NOC3High, $3I >>$	86
6.2.2.2 Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti NOC3Low, $3I >$	86
6.2.2.3 Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, mžikový stupeň NOC3Inst, $3I >>>$..	87
6.2.2.4 Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti NOC3Low, $3I >$	88
6.2.2.5 Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, mžikový stupeň NOC3Inst, $3I >>>$..	88
6.2.3 Nastavení diferenciální funkce ochrany transformátoru RET 543, Stabilizovaná $3\Delta I >$ a mžiková $3\Delta I >>$ diferenciální ochrana transformátoru Diff6T.....	89
6.2.3.1 Základní parametrizace diferenciální funkce	89

6.2.3.2 Popudový poměr (starting ratio)	90
6.2.3.3 Základní nastavení (basic setting)	91
6.2.3.4 Nastavení bodu zlomu 2 (Turn-point 2).....	91
6.2.3.5 Blokování 2. harmonickou ($I_{2f}/I_{1f} >$)	92
6.2.3.6 Nastavení vypínací hodnoty mžikového stupně $3\Delta I >>$	92
6.2.3.7 Blokování a odblokování 5. harmonickou ($I_{5f}/I_{1f} > , I_{5f}/I_{1f} >>$)	92
6.3 Výpočet nastavení ochrany REF 542plus pro kabelový vývod motoru.....	93
6.3.1 Výpočet I_{dov} a kontrola kabelu WM-2 na dovolené oteplení při zkratu	93
6.3.2 Výpočet nastavení jednotlivých funkcí ochrany REF 542plus	94
6.3.2.1 Ochrana rozběhu motoru.....	94
6.3.2.2 Ochranná funkce při zablokovaném rotoru	94
6.3.2.3 Tepelná ochrana proti přetížení	95
6.3.2.4 Ochrana počtu startů motorů	97
6.3.2.5 Nadproudová funkce ochrany	98
7. Problematika spínacích přepětí	99
7.1 Vznik přechodného spínacího přepětí „TRV“	99
7.1.1 „TRV“ při vypínání zkratových proudů induktivního charakteru	99
7.1.2 „TRV“ při vypínání malých induktivních proudů výkonovými vypínači	100
7.1.3 „TRV“ při vypínání středních induktivních proudů vakuovými vypínači	102
7.2 Doporučené způsoby ošetření spínacích přepětí	103
7.3 Měření spínacích přepětí na rozvodně R22 kV, rozváděči R61	105
7.3.1 Stručný popis měření	105
7.3.2 Výsledky ze srovnávacího měření	106
7.3.3 Výsledky měření spínacích přepětí na R61.....	110
Závěr.....	111
Literatura.....	115
Přílohy	116

Úvod

Ve své diplomové práci se budu z největší části zabývat modernizací části elektrických ochran na rozvodně R22 kV a výpočtem aktuálních zkratových poměrů pro tuto rozvodnu. Prostřednictvím právě této rozvodny je zajištěno napájení všech podružných rozveden úpravárenského komplexu (dále jen ÚK) na lokalitě Dolu Darkov. ÚK jako celek zajišťuje zpracování surové těžby z lokality Dolu Darkov, Dolu ČSM a Dolu Karviná. Technologie ÚK je přizpůsobena selektivnímu zpracování koksovatelného a energetického uhlí včetně expedice k odběratelům podle různých jakostních parametrů.

V minulých letech proběhla na rozvodně R22 kV investiční akce zaměřena na obměnu původních máloolejových vypínačů typu HG4 za vakuové vypínače vn firmy ABB typ VM1, jako retrofity právě původních máloolejových vypínačů. Nasazení těchto vakuových vypínačů se však dvakrát nepříznivě projevilo při provozování technologie vakuových vývěv I. linky na provoze vodního prádla, kde došlo k poškození dvou vysokonapětových asynchronních motorů ZSE MEZ typ 1N4 355. Na podniku považujeme za příčinu poškození motorů, neošetření spínacích přepětí při vypínání těchto vn motorů pod přetížením nově instalovanými vakuovými vypínači. Domníváme se, že tato spínací přepětí zřejmě vícekrát převýšila maximální dovolenou hodnotu napětí (cca kolem $U_{ef} = 8 \text{ kV}$), kterou ještě izolace vinutí tohoto staršího typu motoru zvládne. Tímto dějem docházelo k postupné degradaci izolace vinutí, což mělo za následek vznik mezizávitového zkratu a došlo k poškození motorů. Navíc kvůli špatnému selektivnímu působení dosavadních el. ochran, doprovázelo tyto těžké zkraty odstavení části nadřazené rozvodny HR 22 kV . To mělo samozřejmě za následek odstavení el. energie napájející další objekty na lokalitě Dolu Darkov. Dočasně se problematika vypínání motorů vakuových vývěv I. linky vyřešila znovu nasazením máloolejových vypínačů, což ovšem v dlouhodobějším horizontu nic neřeší, poněvadž jejich pravidelná údržba oproti vakuovým vypínačům je poměrně nákladná a náročná.

Vzhledem k výše uvedeným skutečnostem, chci v diplomové práci navrhnout, alespoň částečné zmodernizování systému chránění hlavních transformátorů T7, T8 a vývodů pro vn motory na rozvodně R22 kV . Nové ochrany budou díky stále vyspělejším ochranným funkcím lépe chránit tato důležitá a drahá el. zařízení, a zároveň by měly poskytovat větší spolehlivost a rychlost působení s dodržením selektivity působení, což je jeden z cílů této práce. Protože je diplomová práce poměrně rozsáhlá, bude v praktické části diplomové práce uveden pouze příklad výpočtu nastavení pro ochranu transformátoru T7 (T8 má totožné parametry) a ochrany motorového vývodu pouze pro jeden z motorů vakuových vývěv I. linky. U těchto úkonů je zapotřebí teoretických znalostí v oblasti chránění, které jsou probrány v první části diplomové práce, se zaměřením hlavně na ochrany vn motorů a transformátorů.

Pro návrh ochran je důležité znát aktuální zkratové poměry v průmyslovém podniku, proto je další část diplomové práce zaměřena na získání znalostí správných postupů k určení zkratových poměrů dle platné normy ČSN EN 60 909-0.

Další, už hlavní praktická část začíná uvedením popisu rozvodny R22 kV vč. rozváděče R61. Je zde popsán způsob napájení ÚK, současný stav chránění a jsou zde také uvedeny důležité parametry pro výpočty aktuálních zkratových poměrů na rozvodně R22 kV , dle vyznačených míst zkratu F1, F2 a F3 potřebné k výpočtům nastavení ochran nebo k dimenzování el. zařízení. Na tyto výpočty navazuje samotný návrh elektrických ochran s výpočtem parametrů pro jednotlivé ochranné funkce.

V poslední kapitole praktické části vysvětlím původ již zmíněných spínacích přepětí, ohrožujících vn motory. Provedu zhodnocení výsledků proběhlých měření spínacích přepětí a uvedu, jakým směrem by se mělo ubírat ošetření těchto přepětí dále, aby se omezila na přijatelnou úroveň a vakuové vypínače mohli být na těchto místech znovu nasazeny.

1. Teoretický rozbor ochrany a jištění se zaměřením na motory vn a transformátory

1.1. Popis poruchových stavů v elektrizační soustavě [1] [2]

V elektrizační soustavě existuje celá řada poruchových stavů, které vyvolávají různé odchylky od jmenovitého harmonického průběhu napětí a proudu a ohrožují tak bezpečnost provozu. V této kapitole si stručně popíšeme všechny možné poruchové stavy s tím, že v dalších částech práce se budeme z větší části zabývat hlavně zkraty.

Zkrat – vzájemné spojení dvou nebo tří fází, popřípadě spojení jedné fáze se zemí v síti s přímo uzemněným, nebo nepřímo uzemněným uzlem pomocí rezistoru. Zkrat může být způsoben únavou izolace, vlivem počasí (vítr, bouře), mechanickým poškozením zařízení nebo také špatnou manipulační obsluhou.

Důsledky při vzniku zkratu:

- zvýšené tepelné i silové namáhání elektrických vedení, spotřebičů i ostatních rozvodných zařízení
- pokles napětí nepřímo úměrný elektrické vzdálenosti od místa zkratu.

Snížení činného výkonu v důsledku vzniku zkratu může vést ke ztrátě stability synchronních generátorů, asynchronního chodu elektrizační soustavy a k jejímu případnému rozpadu.

Zemní spojení – galvanické spojení jedné fáze se zemí v síti s izolovaným uzlem, popřípadě v síti s nepřímo uzemněným uzlem (uzel uzemněn přes zhášecí tlumivku).

Důsledky vzniku zemního spojení:

- při přerušovaném zemním spojení vznik nebezpečných přepětí
- zvýšené nebezpečí vzniku následného zkratu.

Přetížení – průchod příliš velké energie zařízení, zatěžování vodičů a elektrických zařízení proudem vyšším než je dovolené zatížení zařízení. Krátkodobé přetížení nemusí být nebezpečné, dlouhodobé přetížení je však nebezpečné vždy.

Důsledky vzniku přetížení:

- zvýšené tepelné namáhání
- urychlení stárnutí izolace.

Nesouměrné zatížení – provozní stav, při kterém jsou jednotlivé fáze statoru alternátoru (motoru) zatěžovány různým proudem. V důsledku toho vzniká zpětná složka proudu, která vytváří magnetické pole otáčející se dvojnásobnou úhlovou rychlostí rotoru (v opačném smyslu). V rotoru se indukují vířivé proudy, jejichž průchodem se může rotor nebezpečně zahřívat. Nesouměrnost zatížení může být způsobena přerušením některé fáze nebo nesouměrností zátěže.

Důsledky vzniku nesouměrného zatížení:

- přehřátí motoru.

Zvýšení kmitočtu – bývá způsobeno poruchou regulace výkonu.

Důsledky zvýšení kmitočtu:

- působí mechanicky na chráněné zařízení i na připojené stroje.

Snížení kmitočtu – dochází k němu přetížením zdrojů energie v síti.

Důsledky snížení kmitočtu:

- zvětšení magnetizačních proudů, tím zvětšení ztrát a oteplení.

Zpětný tok výkonu - způsoben ztrátou výkonu pohonu nebo špatnou energetickou bilancí sítě.

Přepětí je v trojfázových střídavých soustavách jakékoli napětí mezi fázemi nebo mezi fázemi a zemí, které svou velikostí překračuje amplitudu jmenovitého napětí. Přepětí se mohou lišit svou velikostí, časovým průběhem, příčinou svého vzniku a frekvencí výskytu.

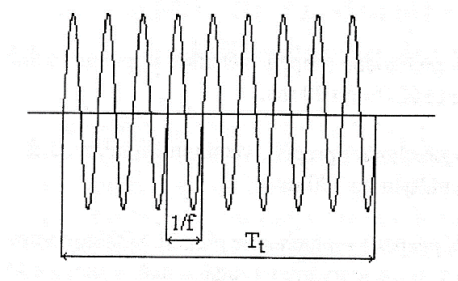
Přepětí dělíme na atmosférická a provozní.

Atmosférická přepětí vznikají úderem blesku do vedení nebo do nekrytých částí elektrických zařízení. Mohou vzniknout také indukci při úderu blesku v blízkosti vodičů nebo jiných částí rozvodného zařízení.

Provozní přepětí jsou způsobena spínacími pochody v obvodech s velkou indukčností nebo kapacitami (při odepínání zkratů, při přerušovaném zemním spojení).

Mezinárodní norma IEC 71-1 dělí přepětí podle časového průběhu do těchto skupin:

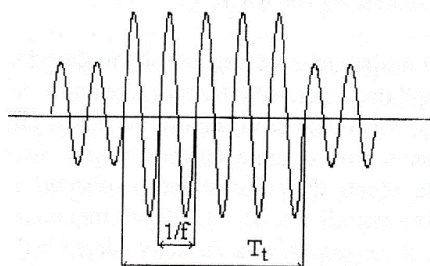
- a) *trvalé přepětí* – střídavé přepětí síťové frekvence a konstantní efektivní hodnoty.



Obr. 1.1a - trvalé přepětí

$$f = 50 \text{ nebo } 60 \text{ Hz}; \quad T_t \geq 3600 \text{ s}$$

b) *dočasné přepětí* - střídavé přepětí síťové frekvence a doby trvání od 0,03 do 3600 s.

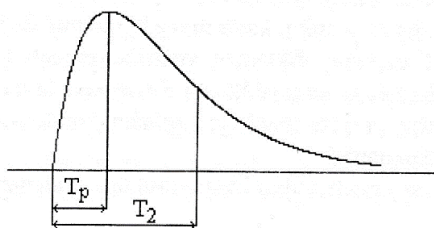


Obr. 1.1b – dočasné přepětí

$$500 \text{ Hz} > f > 10 \text{ Hz}; \quad 3600 \text{ s} \geq T_t \geq 0,03 \text{ s}$$

c) *přechodné přepětí* – přepětí trvající několik milisekund nebo méně, které má tlumený oscilační nebo impulzní průběh. Tato přepětí se ještě dělí na:

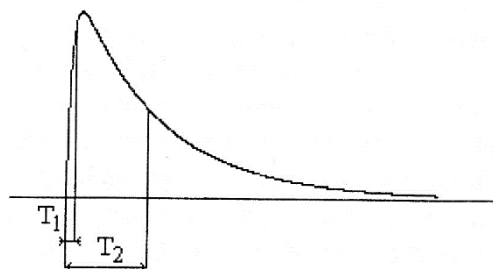
- přechodné přepětí s dlouhým čelem



Obr. 1.1c – přechodné přepětí s dlouhým čelem

$$5000 \mu\text{s} \geq T_p > 20 \mu\text{s}; \quad T_2 \leq 20 \text{ ms}$$

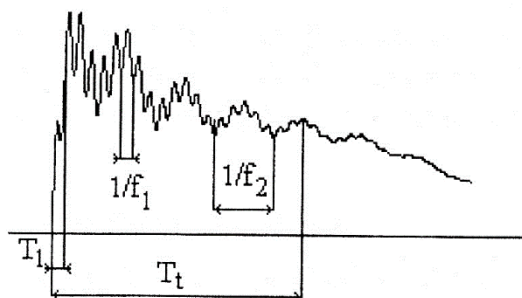
- přechodné přepětí s krátkým čelem



Obr. 1.1d – přechodné přepětí s krátkým čelem

$$20 \mu\text{s} \geq T_1 > 0,1 \mu\text{s}; \quad T_2 \leq 300 \mu\text{s}$$

- přechodné přepětí s velmi krátkým čelem



Obr. 1.1e – přechodné přepětí s velmi krátkým čelem

$$100 \text{ ns} \geq T_1 > 3 \text{ ns}; \quad T_t \leq 3 \text{ ms}$$

$$0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}; \quad 30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$$

- d) *kombinované přepětí* – přepětí vzniklé současným výskytem dvou druhů přepětí.

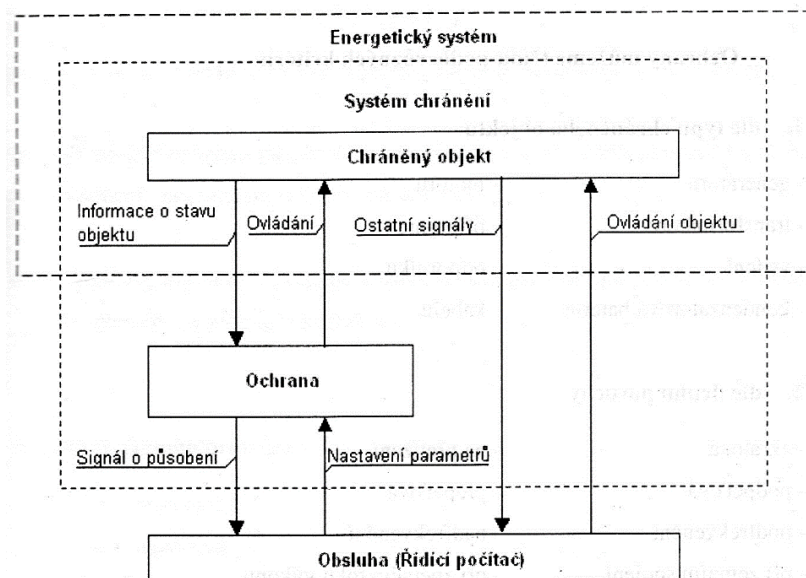
Důsledky vzniku přepětí:

- poškození a stárnutí izolace
- přídavné ztráty
- zvýšené nebezpečí poškození izolace a tím vzniku zkratu.

1.2. Základní pojmy z teorie ochran a jištění [1]

Ochrana je zařízení, které kontroluje provozní bezpečnost a spolehlivost určité části energetického systému. Pomocí přístrojových transformátorů proudu a napětí, popř. z dalších čidel, získává informaci o jednotlivých veličinách chráněného objektu. Ochrana musí rozlišit, je-li chráněný objekt v mezích normálního provozu, nebo zda jde o poruchu.

Chráněný objekt je fyzikální zařízení, které přenáší energii v rámci svého okolí. Okamžitou funkci chráněného objektu lze určit pomocí stavových veličin. Stavová veličina je fyzikální veličina chráněného objektu (např. napětí, proud, okamžitý výkon, okamžitý kmitočet), jejíž velikost charakterizuje současné chování objektu. Ovládání objektu je soubor zařízení, přes které působí ochrana na objekt. Jsou to vypínač, odbuzovače, uzávěry páry atd. Porucha je taková fyzikální změna na objektu nebo na veličinách, která způsobí, že stav objektu překročí meze normálního provozu. Tyto vazby mezi ochranou a chráněným objektem jsou naznačeny na následujícím obrázku.



Obr. 1.2 – vazby mezi ochranou a chráněným objektem

Základním úkolem chránění elektrických zařízení je zabezpečit, aby nedošlo k takovému oteplení tohoto zařízení, které by ho poškodilo. Oteplení el. zař. rozdělujeme na oteplení, díky kterému dochází k předčasnému stárnutí izolace (nedodržení dovoleného zatížení) a na oteplení při, kterém dochází k trvalému poškození izolace s následkem destrukce zařízení (elektrický zkrat nebo přepětí na zařízení).

1.2.1. Třídění ochran

Samotné ochrany rozdělujeme podle těchto kritérií:

a) dle typu chráněného objektu

- | | | |
|--------------|--------------------------|-------------|
| - generátoru | - transformátoru | - vedení |
| - motoru | - kabelu | - přípojníc |
| - odporu | - kondenzátorové baterie | |

b) dle druhu poruchy, kterou mají identifikovat

- | | | |
|---------------------------|---------------------|--------------------------------|
| - zkratová | - podpětíová | - podfrekvenční |
| - při zemním spojení | - při ztrátě buzení | - při přetížení |
| - přepětíová | - nadfrekvenční | - při nesymetrii (I a U) |
| - při zpětném toku výkonu | | |

c) dle doby působení

- časově závislé ochrany

$$t = \frac{K}{(i-i_{\infty})^n} \quad \text{pro } i > i_{\infty}; \quad t = \infty \quad \text{pro } i \leq i_{\infty}$$

- časově polozávislé ochrany, kombinace s nezávislou charakteristikou

$$t = \frac{K}{(i-i_{\infty})^n} \quad \text{jen do velikosti proudu } i_0. \text{ Pro větší proudy } i > i_0 \text{ už nezkracuje dobu působení.}$$

- časově nezávislé ochrany

působí v nastaveném čase t_k při dosažení proudu i_k . Doba působení nezávisí na velikosti proudu $i > i_k$.

- mžikové ochrany

je v principu nezávislá ochrana, která působí při překročení nastaveného proudu i_k bez zpoždění.

d) dle funkčního principu

- proudová

- napěťová

- distanční

- rozdílová

- srovnávací

- wattová

- jalová

- frekvenční

- při nesymetrii

Vývoj elektrických ochrany můžeme rozdělit do následujících základních tří etap:

- klasické elektromechanické ochrany,
- elektronické ochrany,
- digitální ochrany.

V současných podmínkách ES se používají prakticky všechny vývojové typy ochrany. Jejich použití ovlivňuje hlavně stupeň důležitosti chránění daného elektrického zařízení, přesnost a spolehlivost použitého typu ochrany. Při rekonstrukcích el. stanic, rozveden a bloků elektráren se přechází výhradně na použití digitálních ochrany, jako ochrany poskytujících nejvyšší standard v této oblasti.

U elektrické ochrany hodnotíme objektivnost chránění. Autonomní ochrany (elektromechanické, elektronické) působí správně jen z pohledu jednoho chráněného objektu. Objektivní ochrany vyhodnocují poruchový stav z pohledu celé ES nebo její části. Tyto ochrany potřebují pro svou správnou činnost složité algoritmy. Mezi tyto objektivní ochrany zařazujeme digitální ochrany.

V problematice chránění není důležité jen používání nových technologií v konstrukci ochrany, ale i způsob získávání, zpracování a interpretace informací.

1.2.2. Základní požadavky kladené na ochrany

Hlavním cílem použití ochrany či systému ochran je včasná izolace části elektrické sítě, ve které vznikla porucha, aniž by nepostižená část sítě vyžadovala dodatečnou obsluhu. Z toho vyplývají následující požadavky na ochrany:

- **Spolehlivost funkce ochrany** – je to pravděpodobnost, že ochrana vykoná požadovanou funkci za daných podmínek a v daném časovém intervalu tzn., že nebude ani v poruše, ani nebude nadbytečně působit.
- **Rychlost ochrany** – je dána dobou působení ochrany, snižuje míru rizika poškození chráněného objektu. Rychlé vypnutí poruchy zvětšuje stabilitu soustavy.
- **Citlivost ochrany** – velikost stavové veličiny, na kterou je ochrana nařízena a při které působí.
- **Přesnost ochrany** – poměrná chyba citlivosti ochrany vyjádřená v procentech.
- **Přídržný poměr ochrany** – poměr velikosti stavové veličiny při návratu ochrany k velikosti stavové veličiny při rozběhu ochrany.
- **Rozlišovací schopnost** – schopnost ochrany rozeznat dva blízké stavy objektu, které se liší o Δx , z nichž jeden je poruchový a druhý ne. Minimální velikost Δx , kterou ochrana rozliší, nazýváme rozlišovací schopností ochrany.
- **Doba působení ochrany** – časový úsek mezi vznikem poruchy a signálem na výstupu ochrany.
- **Absolutní chyba** – definována jako rozdíl mezi naměřenou a skutečnou hodnotou
- **Selektivita** – schopnost ochrany nepůsobit mimo objekt nebo na poruchy dané stavovou veličinou, na kterou ochrana nesmí působit. Vypíná se takto, co nejmenší úsek elektrizační soustavy postižené poruchou, čímž se zmenšuje pravděpodobnost ztráty stability soustavy.

Selektivita se zajišťuje:

- časovým odstupňováním vypínacích časů
- odstupňováním hodnoty nastavené veličiny
- měřením více veličin současně (impedanční ochrany)
- měřením veličiny na více místech (rozdílové a srovnávací ochrany, logické automatiky)
- směrovým nastavením ochran

- **Zálohování ochran** – v případě poruchy hlavní ochrany, je třeba zajistit vypnutí poruchy záložní ochranou.
- **Jednoduchost obsluhy** – systém ochran má být navržen tak, aby umožňoval co nejjednodušší obsluhu, a současně plnil všechny předepsané funkce. Každou další funkcionalitu ochrany (vnášející riziko chybné manipulace), která není nezbytně nutná, je třeba pečlivě zvážit.
- **Ekonomická návratnost** – při kalkulaci ekonomické návratnosti, je třeba vzít v úvahu zejména četnost poruch, cenu chráněného zařízení a ztráty způsobené výpadkem dodávky elektrické energie. Základní požadavky stanovuje ČSN 333051, která je pro většinu aplikací vyhovující.

1.2.3. Základní členy ochran

Ochrana se skládá z těchto základních členů:

- a) **Vstupní člen** – převádí vstupní signál na zpracovatelný tvar a úroveň. Jmenovité vstupní hodnoty pro ochrany jsou 100 V a 5 A , 1 A , $0,2\text{ A}$ nebo 150 mV pro senzory. Tyto veličiny jsou přivedeny na vstup ochrany z měřicích transformátorů nebo senzorů napětí a proudu. Vstupní členy digitálních ochran jsou tvořeny A/D převodníky, které provedou vzorkování a následně kvantování vstupního signálu, čímž se převede analogový signál na diskrétní.
- b) **Popudový člen** – při vzniku poruchy dává signál měřicímu členu a logice ochrany. Popudový člen musí mít co největší citlivost na kontrolovanou veličinu, aby se zabezpečila spolehlivá činnost ochrany jako celku.
- c) **Měřicí člen** – rozhoduje o poruše v objektu. Na jeho vstup je přiveden stav chráněného objektu. Je na něm závislá většina vlastností elektrické ochrany, jako je selektivita, citlivost a přesnost. Vlastnost elektrické ochrany je daná algoritmem měřicího členu. Charakteristika ochrany odpovídá použitému měřicímu členu, resp. principu měření – velikost fázoru střídavé elektrické veličiny je vdaném časovém okamžiku jednoznačně určená okamžitou hodnotou a fázovým posunem. Z tohoto důvodu mohou měřicí členy pracovat na amplitudovém (nezávislý, závislý, rozdílový, součinnový a amplitudový měřicí člen) nebo fázovém (fázový komparátor) principu.
- d) **Logika** – zpracovává signál z popudu a určuje funkci měřicího členu. Na základě signálu z měřicího členu pak dává pokyn koncovému členu. Vstupy i výstupy jsou booleovské funkce (strukturu lze vytvořit pomocí součtu, součinu a negace). Logika se realizuje klasickými relé, diodami, tranzistory, integrovanými obvody nebo technickým a programovým vybavením v digitálních ochránách.
- e) **Koncový člen** – upravení signálu logiky tak, aby byl schopen provést vypínačem vypnutí chráněného objektu, a současně signalizovat poruchu obsluze.
- f) **Časový člen** – zajišťuje prodloužení působení ochrany. Používá se z těchto důvodů:
 - zajištění selektivity,

- využití možné akumulace energie v objektu, např. dovolené přetížení chráněného objektu,
- vyloučení chybného působení ochrany (přechodná porucha krátkého trvání, např. přesycení PTP aperiodickou složkou zkratového proudu).

g) Napájecí člen

- h) Filtry souměrných složek proudu a napětí** – důležité stavové veličiny objektu. Podle jejich velikostí lze určit, o jaký druh poruchy se jedná.

1.2.4. Informace a technická data pro výběr ochrany a výpočet jejího nastavení

Dá se říci, že na každé el. zař. (kabelové vedení, transformátor, motor atd.) můžeme hledět z pohledu jeho tepelného modelu obecně stejně. Každé silnoprůdové el. zař. má svou tepelnou konstantu, kterou bohužel ne vždy známe. Na el. zař. působí procházející el. proud a také jeho okolí, které má na zařízení velmi významný vliv. Může toto zařízení ještě více oteplovat, nebo naopak ochlazovat. Stejně důležitý je i vliv el. zař. na jeho okolí, tzn. jak svým působením negativně ovlivňuje okolí (oteplování, nebezpečí požáru, iniciace výbuchu, rušení atd.). Z tohoto důvodu je potřebné mít pro výběr ochrany a jejího nastavení důležité informace o el. zař. a jeho okolí:

- *Informace o provozu zařízení* – informace o způsobu provozu zařízení (trvalé, občasné, zařízení slouží jako rezerva apod.).
- *Informace o stavu zařízení* – zda je zařízení nové, několik let nebo desítek let staré, které zažilo přetěžování (špatný stav izolace), průchozí zkratů (uvolněné vinutí) atd.
- *Informace o stávajícím systému chránění*
 - informace k pochopení stávajícího systému chránění při implementaci svého řešení do již stávajícího systému (modernizace a výměna zařízení omezeného celku)
 - informace o nastavení ochrany v „nadřazených“ rozvodnách hlavně kvůli zajištění selektivního působení ochrany
 - informace o nastavení ochrany v „podřízených“ rozvodnách
 - typ vypínačů použitých v chráněné soustavě a dobu jejich vypnutí
 - jednopólové schéma celé chráněné soustavy

Základem pro výpočet nastavení ochrany jsou pokud možno co nejpřesnější vstupní údaje (technická data). I když se budou některé požadavky zdát přemrštěné (např. požadavky výrobce atd.), jsou nutné pro do přesnění oteplovacích charakteristik apod. Každý výrobce má svá specifikata, podle výrobce se dá vyhledat výrobek v katalogu výrobků a získat tak další údaje, které nám zadavatel neposkytl.

Pro výpočet nastavení ochrany je nutné znát tyto údaje:

- **Zkratové poměry** – zkratové poměry na přípojnicí vstupní rozvodny
 - $S''_{k3 \max}$ nebo $I''_{k3 \max}$

- $S_{k\ min}''$ nebo $I_{k\ min}''$

▪ **Jmenovité hodnoty ochrany**

- Jmenovitý proud vstupních obvodů ochrany I_n
- Jmenovité napětí vstupních obvodů ochrany U_n
- Jmenovité napájecí napětí U_{pn}
- Přetížitelnost vstupních napěťových obvodů udává maximální, trvale dovolené napětí na vstupních napěťových obvodech ochrany, obvykle je $1,2 \cdot U_n$ ochrany
- Přetížitelnost vstupních proudových obvodů
 - a) trvalá přetížitelnost I_∞ , obvykle $1,2 \cdot I_n$ nebo $2 \cdot I_n$
 - b) tepelná přetížitelnost I_{th} , udává dovolené přetížení po dobu 1 s, obvykle $50 \cdot I_n$ nebo $100 \cdot I_n$
 - c) dynamická přetížitelnost I_{dyn} , udává dovolenou amplitudu maximálního proudu po dobu jedné půlperiody
- Spotřeba ochrany
- Nařiditelnost ochrany: rozsah měř. veličiny y_t , na kterou lze nastavit citlivost ochrany. Podle typu ochrany, nařiditelnost proudová, napěťová, impedanční, kmitočtová atd.
- Přídržný poměr a doba působení ochrany

▪ **Parametry vedení**

- a) volná vedení
 - typ vodiče, průřez, délka vedení, způsob provozování
- b) kabelová vedení
 - typ kabelu, průřez, počet kabelů, délka kabelu
 - uspořádání (vedle sebe nebo ve svazku)
 - uložení kabelů podle ČSN (v zemi nebo na lávce aj.)
 - způsob provozování

▪ **Parametry transformátorů**

- výrobce, typ, počet odboček, skupinu zapojení vinutí
- jmenovitý výkon $S_n [MVA]$ (štítkový údaj)
- jmenovitá napětí jednotlivých vinutí $U_n [kV]$ (štítkový údaj)
- napětí nakrátko $u_k [\%]$ (štítkový údaj)
- ztráty nakrátko $P_k [kW]$ (štítkový údaj)
- ztráty naprázdno $P_0 [kW]$ (štítkový údaj)
- způsob uzemnění nuly transformátoru (přímo, rezistor, tlumivka)

- způsob provozování transformátoru (zatěžování, paralelní chod)
- způsob odlehčování zátěže (obsluha, bez obsluhy, řídicí systém)
- jestli měření teploty signalizuje nebo vypíná
- zapínací ráz transformátoru (pokud je znám)
- pokud je použita nádobová ochrana – data průvlekového měřicího transformátoru
- způsob jištění transformátoru (např. u transformátoru vn/nn i jištění strany nn)
- okolní teplota °C

▪ **Parametry asynchronních motorů**

- Ze štítkových údajů lze vyčíst
 - ✓ výrobce a typ motoru
 - ✓ jmenovitý výkon P_n , napětí U_n a proud I_n motoru
 - ✓ $\cos \varphi$ motoru
 - ✓ účinnost motoru
- rozběhový proud I_s (štítkový údaj nebo zkušební protokol)
- doba rozběhu t_s (zkušební protokol)
- způsob spouštění motoru (dokumentace)
- maximální povolená doba startu za studena
- počet povolených startů za tepla
- je-li u motoru kompenzace, tak její místo připojení a velikost
- okolní teplota
- chlazení motoru (druh chlazení)
- počet rozběhů za den (data výrobce - katalog)
- konstrukce motoru (druh krytí)
- zda je motor zapínán vypínačem nebo stykačem (projekt)

▪ **Druh soustavy vn (podle uzemnění nuly transformátoru)**

- izolovaná, přímouzemněná, nepřímo uzemněná pomocí tlumivky nebo odporníku

▪ **Parametry přístrojových transformátorů, viz kapitola 1.3.**

- použité PTP (přístrojové transformátory proudu):
 - ✓ štítkové údaje, vč. vnitřního odporu
 - ✓ délku a typ kabelu, vč. průřezu kabelu mezi PTP a ochranou
 - ✓ počet ochranných připojení na vinutí PTP – určeno pro ochrany
- použité PTN (přístrojové transformátory napětí)

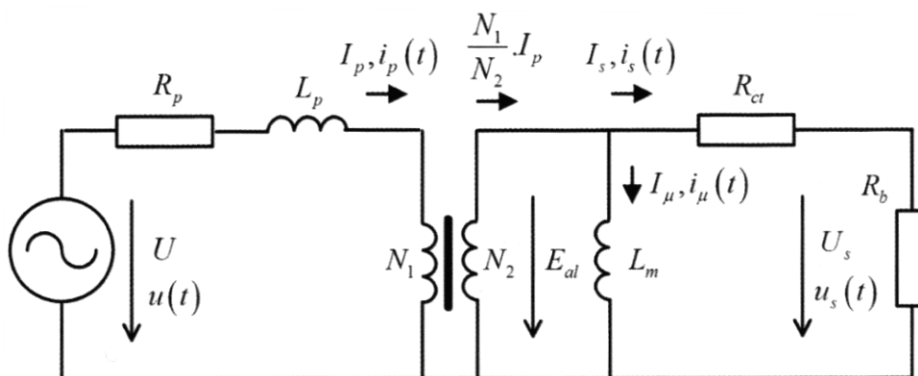
1.3 Měřicí zařízení pro ochrany [3]

Tyto zařízení přenášejí do analogových vstupních obvodů ochran informaci o chování systémových veličin. Ve většině případů se jedná přístrojové transformátory proudu (PTP) a napětí (PTN). Výjimkou mohou být tepelné senzory pro tepelná relé či optické smyčky zábleskových ochran. PTP i PTN slouží k redukci velkých proudů a napětí v ES na bezpečné malé hodnoty analogových signálů, které jsou využívány v ochranách pro jejich digitální zpracování. Další funkcí PTP a PTN je izolace měřicích obvodů od soustavy vysokého napětí.

Přístrojový transformátor proudu PTP

Je to speciální druh transformátoru, jehož primární vinutí je tvořeno přímo vodičem energetického systému, na kterém je umístěno toroidní jádro se sekundárním vinutím. Díky nízkým hodnotám hlavní i rozptylné reaktance, nedochází připojením PTP k ovlivnění poměrů v soustavě.

Je důležité si uvědomit, že PTP netransformuje primární proud, jako tzv. ideální transformátor tzn., že v praxi nelze zanedbat nelinearitu magnetického jádra, rozptylné reaktance a zátěž na sekundární straně. Vychází se z náhradního schémata PTP, viz obr. 1.3, kde I_μ je magnetizační proud, který je určující pro syčení jádra.



Obr. 1.3 - náhradní schéma PTP

V periodicky ustáleném stavu bude platit:

$$I_S = \frac{N_1}{N_2} \cdot I_P - I_\mu$$

Magnetizační proud I_μ roste úměrně se zvyšujícím se primárním proudem I_P . Do určité hodnoty primárního proudu je velikost magnetizačního proudu v poměru k sekundárnímu proudu zanedbatelná. Poté se jádro začíná přesycovat, což se projeví výrazným narůstáním proudu I_μ na úkor proudu I_P (sinusový průběh proudu se zkresluje a oproti ideálnímu přenosu se snižuje jeho efektivní hodnota). To vše vede k rychlému zvyšování chyby měření PTP.

Jádra PTP rozlišujeme podle účelu použití na:

- *přesná měřicí jádra* – přesnost měření v rozsahu provozních proudů a rychlé přesycení u nadproudů (omezení maximální hodnoty sekundárního proudu vstupujícího do elektroměru)
- *jisticí jádra* – požadován přenos pro co největší nadproudy i za cenu nižší přesnosti měření.

Nevhodně zvolené PTP mohou představovat velký problém. Např. motor 6 kV o výkonu 200 kW má jmenovitý proud kolem 25 A. Pokud bychom použili PTP s převodem 25/5 A, může dojít až k jejich 1000 násobnému přesycení. Ve větších provozech je poměrně běžný zkratový proud nabývající hodnot kolem 25 kA. Proto je za potřeby volit PTP s dostatečným výkonem a nadproudovým číslem s ohledem na předpokládanou velikost zkratových proudů. PTP se skutečným nadproudovým číslem n^* alespoň 30 (viz. kap. 1.4.4 Zkratová ochrana), již ve většině případů těmto požadavkům vyhovují.

Z výše uvedeného textu vyplývá, že výběr typu PTP se správnými parametry je důležitý pro bezchybnou funkci jištění chráněného objektu, v mém případě jištění asynchronního motoru.

Podle normy IEC 60044-1 uvádějí výrobci pro jisticí jádra PTP tyto parametry:

- jmenovitý proud primárního a sekundárního vinutí I_{pn}, I_{sn}
- třídu přesnosti pro jisticí jádra (nejčastěji 10P nebo 5P)
- max. nadproudové číslo, při kterém není překročena jmenovitá třída přesnosti měření n_{ALFn} (accuracy limit factor)
- jmenovitou zátěž $S_{bn} = R_{bn} \cdot I_{sn}^2$ (VA) na sekundáru, ke které uvedené parametry vztahují.

Přístrojový transformátor napětí PTN

PTN se vyrábějí ve dvou provedeních:

- *induktivní* – má své primární vinutí na jednom konci galvanicky spojené s fázovým vodičem,
- *kapacitní* – skládá se z kapacitního děliče napětí a induktivně je měřena pouze příslušná část fázového napětí.

Oba typy dostatečně přesně měří fázové napětí. Na rozdíl od PTP nepředstavují jevy spojené s přesycováním zásadní problém, protože provoz ES je limitován do výše svého maximálního provozovacího napětí a poruchy v síti většinou vedou ke snížení nebo úplné ztrátě napětí. Pro přenos napětí na sekundární stranu, tak prakticky vždy s velmi malou odchylkou platí:

$$U_S = \frac{N_1}{N_2} \cdot U_P$$

PTN se také rozlišují podle použití na měřicí a jisticí jádra s obdobnými požadavky jako u PTP.

Podle normy IEC 60044-2 uvádějí výrobci pro jisticí jádra tyto parametry:

- jmenovité napětí primárního a sekundárního vinutí U_{pn} , U_{sn}
- třídu přesnosti pro jisticí jádra (nejčastěji 3P nebo 6P)
- jmenovitou zátěž $S_{bn} = U_{sn}^2 / R_{bn}$ (VA) na sekundáru, ke které uvedené parametry vztahují.

Standardní převody PTN jsou $U_{pn} // 100 / \sqrt{3}$ (V) nebo $U_{pn} // 110 / \sqrt{3}$ (V).

1.4. Chránění asynchronních motorů vn [1]

V oblasti vysokého napětí 6 kV a někdy i 10 kV se navrhují motory větších výkonů, než tomu je u nízkého napětí. Spodní hranice se pohybuje od 150 kW. Protože jsou ceny těchto motorů vysoké, jsou zde také vysoké požadavky na jejich chránění. Pod pojmem motorová ochrana se vždy jedná o celý soubor ochran.

Základní funkce motorové ochrany:

- zkratová ochrana
- ochrana rozběhu motoru
- tepelná ochrana
 - tepelný model
 - tepelná ochrana zařízení pro vyhodnocení teploty
- zemní ochrana
- ochrana při nesymetrii

Další používané funkce:

- ochrana při podpětí
- ochrana proti opakovaným startům - počítadlo startů motoru a blokování dalšího zapnutí při překročení dovoleného počtu startů za hodinu
- ochrana při zablokovaném rotoru ve spojení se snímačem otáček
- podproudová nebo podvýkonová ochrana
- diferenciální (rozdílová) ochrana

1.4.1 Tepelná ochrana

Tepelná ochrana je základní funkce motorové ochrany, chrání motor proti přetěžování. Tepelný model by měl podle vzorku proudu procházejícího motorem určit oteplení vinutí a rozhodnout, zda je dosažená teplota nižší nebo vyšší, než maximální povolená teplota izolace. Dlouhodobé překračování této teploty má za následek výrazné zkrácení životnosti motoru. Například trvalé přetěžování motoru proudem 110 % jmenovité hodnoty, způsobí oteplení

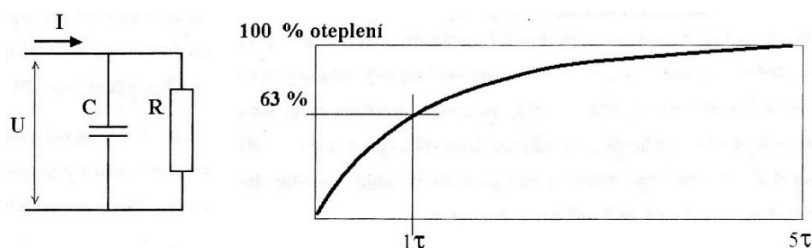
odpovídající I^2 tedy 121 % a může snížit životnost motoru až na 20 % běžné životnosti motoru, přibližně z 20 let na 4 roky. Z toho vyplývá, že staré ochrany s přesností měření cca 15 % mohou chránit motor nedostatečně. U moderních ochran je dosahováno přesnosti lepší, než 2 %.

U tepelné ochrany se vychází z jednoho z těchto tepelných modelů:

- základní jednoduchý tepelný model
- běžný tepelný model se třemi časovými konstantami
- tepelný model s využitím teorie horké skvrny
- dvousložkový tepelný model

Základní (jednoduchý) tepelný model

Motor považujeme za jednotělesovou soustavu a elektricky si ho můžeme představit a principiálně popsat následovně:



Obr. 1.4.1a - základní tepelný model a oteplovací konstanta τ

Motor běží a ohřívá se ztrátovým výkonem podle velikosti procházejícího proudu I s časovou konstantou τ , kterou navrhnul výrobce motoru (nejčastěji 30 až 80 min.). Časová konstanta je daná tepelnou kapacitou stroje C a výkonem chlazení R . Při jmenovitém zatížení motoru dosáhne teplota ze studeného stavu za 1τ , 63 % z max. hodnoty a za 5τ se teplota ustálí na jmenovité hodnotě, tedy např. na 130 °C. Při max. teplotě okolí 40 °C, bude 100 % oteplení 90 °C (130 - 40 = 90 °C).

Vlivy projevující se při rozběhu a chodu motoru

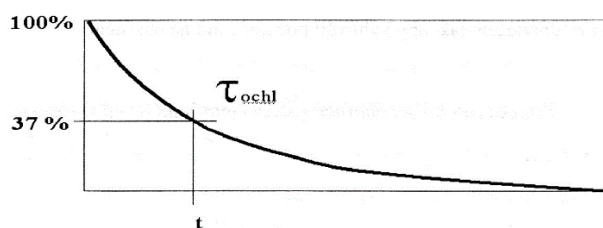
Pochody vznikající uvnitř motoru při rozběhu a chodu motoru jsou základem pro celkové pochopení tepelných modelů, proto si je stručně popíšeme.

Teplo, které vznikne ve statorovém vinutí, musí nejdříve prostoupit izolací, ohřát železo statoru, nuceným oběhem vzduchu být dopraveno na povrch motoru a teprve pak vyzářeno do okolí. Teplota izolace nesmí překročit 155 °C.

Rotorové vinutí, zpravidla hliníková klec nemá izolaci. Předává teplo přímo do železa rotoru a dále chladícím vzduchem na povrch stroje a do okolí. Teplota tyčí může přitom dosahovat až 250 °C. Rotor má vzhledem k rozměrům kratší časovou konstantu než je celotělesová (3-5x kratší, přibližně od 6 do 25 min.).

Pro rozběh motoru je typický proud $6 \times I_n$ ($4-7 \times I_n$ u motorů s kotvou nakrátko, přímo spouštěné). Při rozběhu, hlavně v jeho první části dochází v rotorových tyčích ke skin efektu, proud je vytlačován na povrch tyčí, tím se snižuje účinný průřez vodiče. To představuje další ztráty a další zvyšování teploty rotorových tyčí. Rozběh motoru, hlavně těžký rozběh, se velmi významně projevuje na celkovém oteplení stroje. Podíl jednoho rozběhu může představovat až 30 % z celkové tepelné kapacity stroje. Proto výrobci zaručují 3 rozběhy ihned po sobě ze studeného stavu a 1 až 2 rozběhy z teplého stavu. Zde nastává hlavní nedostatek jednoduchého modelu, tzn. že v případě, kdy jeden těžký start vyčerpá přibližně 30 % z tepelné kapacity, bude podmínka pro tři starty za studena splněna. Při předchozím zatížení tento model už neumožní ani jeden teplý start. Použití tohoto modelu jen v nenáročných aplikacích, kde se motor prakticky nevypíná a kde nevadí zařazení přestávky mezi opětovným zapnutím.

K určení doby, za kterou je možno přehřátý motor znovu zapnout, musíme znát ochlazovací konstantu motoru τ_{ochl} . Tato charakteristika se dá určit měřením teploty vinutí z teplého stavu. Běžná hodnota τ_{ochl} je 4 až 6-krát delší než oteplovací časová charakteristika τ .



Obr. 1.4.1b - ochlazovací konstanta motoru τ_{ochl}

Bežný tepelný model se třemi časovými konstantami

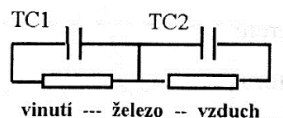
Tento model je vybaven třemi časovými konstantami. Střadač s časovou konstantou přepínanou podle velikosti procházejícího proudu. Při proudu $0,1$ až $2 \times I_n$ je použita konstanta určena pro chod motoru. Při $I > 2 \times I_n$ se uplatňuje druhá konstanta pro rozběh motoru. Třetí konstanta modeluje ochlazování stojícího motoru. Stejně jako jednoduchý model ale neřeší zapnutí z teplého stavu. Zde se dá ale využít rozdílu mezi jmenovitou teplotou pro třídu B (130°C) a třídu F (155°C) nebo využít toho, že teplota okolí bude vždy nižší, než 40°C (jak předepisuje norma). Pokud bychom uvažovali teplotu okolí 30°C , snížili bychom jm. teplotu motoru na 120°C . Tím se rozdíl teplot z jmenovité po maximální pro třídu F zvýší na 35°C , což je pro jeden teplý start již dostačující.

Tepelný model s využitím teorie horké skvrny

Tento model vychází z toho, že při startu motoru se nadměrně ohřejí jen určité části motoru a je-li start úspěšný, teplo se rychle odvádí do chladnějšího okolí těchto částí. Příkladem jsou rotorové tyče. Ty mají provozní teplotu 130°C , jejich maximální dovolená teplota je ale až $200-250^\circ\text{C}$. Rezerva je tedy minimálně 50 %. Výpočty motorů tento stav potvrzují. Při startu roste teplota tyčí velmi rychle, ale jakmile se rotor dostává do otáček, začne se projevovat ventilace a teplota tyčí začne ještě během probíhajícího rozběhu klesat. Po ukončení rozběhu dojde zhruba v průběhu 30 s k vyrovnání teplot mezi tyčemi a železem rotoru.

Dvoustupňový tepelný model

Zatím nejdokonalější tepelný model. Modeluje přechod tepla mezi vinutím, železem a vzduchem. V ochraně je použit dvakrát. Poprvé modeluje teplotu ve statoru motoru a podruhé v rotoru. Vypíná ten stupeň, u něhož dojde dříve k překročení povolené teploty.

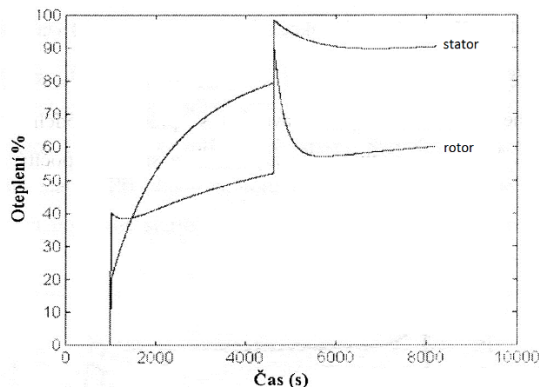


Obr. 1.4.1c - dvoustupňový tepelný model

Tento model počítá oteplení rotoru a statoru dle následujícího vztahu:

$$\Delta\Theta = \left[p \cdot \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot \Delta\Theta_n \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{TC1}} \right) + \left[(1-p) \cdot \left(\frac{I}{I_n} \right)^2 \cdot \Delta\Theta_n \right] \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{TC2}} \right)$$

Časové konstanty $TC1$ a $TC2$ ve většině případů výrobci neuvádí, nabízí tepelný model doporučené hodnoty, maximální i jmenovité teploty rotoru a statoru (navrhují se podle zadané konstrukce a velikosti motoru).



Obr. 1.4.1d - průběh oteplení motoru během opakovaných startů

Tepelná ochrana zařízení pro vyhodnocení teploty

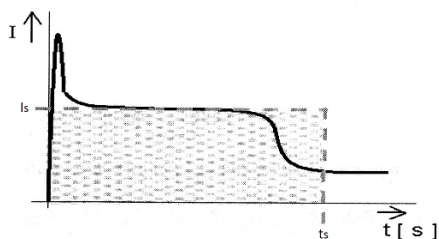
Využívá se pro měření teploty ložisek, chladicího média nebo přímo teploty vinutí motoru. Nevýhodou je určitá setrvačnost, takže výsledky přicházejí se zpožděním. Je ale nenahraditelná např. při poruše chladicího systému, nebo při začínající závadě ložisek motoru. V dnešní době se uplatňuje ve spojení s tepelným modelem, kde místo pevně zadávané teploty okolí 40 °C, jako výchozí stav tepelného modelu, zadává skutečnou naměřenou teplotu okolí. To nám dovolí významně zvýšit dovozené zatížení motoru.

1.4.2 Ochrana rozběhu motoru

Jedná se o nadproudovou ochranu časově zpožděnou. Tato ochrana chrání motor během rozběhu a bývá kombinovaná s ochranou při zablokovaném rotoru a s ochranou, která počítá opakované starty.

Při rozběhu motoru s kotvou nakrátko startovací proud skokem vystoupí na hodnotu $6 \times I_n$ motoru a trvá po celou dobu rozběhu. Při dosažení jmenovitých otáček motoru proud prudce klesne a dále se mění podle skutečné zátěže motoru.

Nejčastěji se využívá nadproudová ochrana s funkcí $I^2(t)$. Ta vypočítává tepelné namáhání během rozběhu a porovnává ho s plochou obdélníka $I_s^2 \cdot t_s$. Ochrana při poklesu napětí během rozběhu sama přepočítá a prodlouží vypínací čas. Tím nedochází k nedefinovanému prodloužení doby rozběhu, jak je tomu při použití ochrany s pevným vypínacím časem.

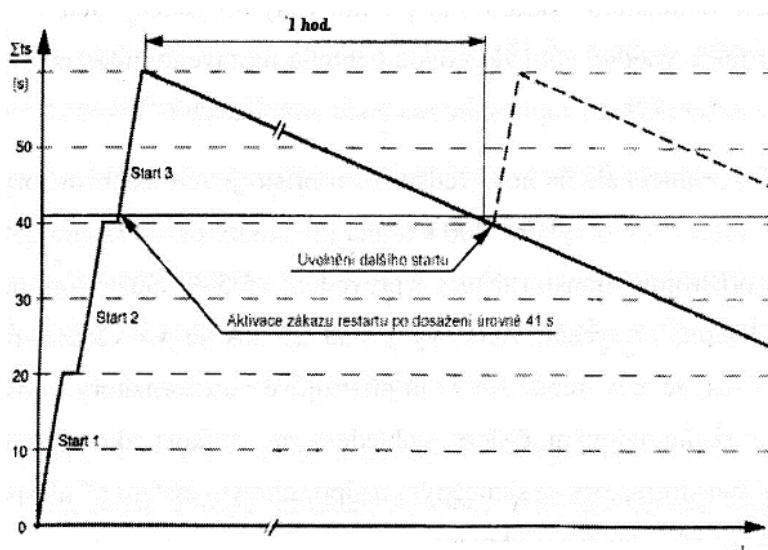


Obr. 1.4.2 - charakteristika ochrany rozběhu motoru

Stejná funkce se někdy používá pro chránění zablokovaného rotoru, to je v případě kdy se motor vůbec nerozběhne a nezačne se chladit. V těchto případech nelze čekat na uplynutí normální doby rozběhu, ale je třeba motor vypnout mnohem dříve. U některých motorů až o 1/3 normální doby rozběhu. Tato funkce využívá signál ze snímače otáček na hřídeli motoru. Když se motor rozbíhá normálně, snímač otáček zablokuje funkci této ochrany a v činnosti zůstává základní ochrana při rozběhu. V opačném případě, když motor zůstane stát nebo nedosáhne požadovaných otáček, ochrana zablokovaného rotoru vypne a zakáže další starty.

1.4.3 Ochrana proti opakovaným startům (ochrana neukončené sekvence)

Výrobce motorů většinou definuje povolený počet startů motoru za hodinu. Tato ochrana pak sčítá doby jednotlivých startů a porovnává je s dovoleným údajem startů za hodinu. Po vyčerpání tohoto limitu, zablokuje další starty. Ochrana pak odečítá nastavenou rychlostí z počítadla startovací doby. Při dosažení hodnoty pod povoleným limitem povolí další start. Stejným způsobem pracuje i při úspěšném startu. Při chodu motoru dojde po nastavené době k úplnému vymazání stavu počítadla startovací doby a ochrana umožní znovu plný počet startů.



Obr. 1.4.3 - diagram počtu povolených startů

1.4.4 Zkratová ochrana

Je to základní ochrana chránící současně motor i přívodní kabel. Funkci zajišťuje mžiková nadproudová ochrana, případně nadproudová časově zpožděná ochrana. Musí rychle vypínat zkratové proudy. Rozběhový proud motoru bývá obvykle $6 \cdot I_n$. Navíc v prvním okamžiku zapnutí dochází ještě k nabíjení kapacit stroje a tento proud dosahuje asi $9 \times I_n$ po dobu přibližně 20 ms. Nastavení zkratové ochrany na $10 \cdot I_n$ nepředstavuje vzhledem k malým jmenovitým proudům motoru žádný problém. Zkratové proudy se v soustavě vn 6 kV pohybují nejčastěji v oblasti desítek kA, a tak je odstup nastavení od minimálního zkratového proudu vždy dostatečný.

Dále se zde přepočítává nadproudové číslo měniče pro skutečnou zátěž, jedná se o tzv. skutečné nadproudové číslo, jak už bylo uvedeno v kap. 1.3.

$$n^* = \frac{\frac{P_m}{I_n^2} + R_2}{R_S + R_2}$$

- n^* skutečné nadproudové číslo
- n nadproudové číslo udávané výrobcem
- P_m jmenovitý výkon měniče
- I_n jmenovitý proud měniče
- R_2 vnitřní odpor měniče
- R_S odpor ochrany a přívodu k ní

1.4.5 Zemní ochrana

Zemní ochrana je určena pro chránění při zemních spojeních na kabelu, ale hlavně v motoru. Funkci ochrany zajišťuje nadproudová ochrana časově zpožděná pro I_0 . Vinutí statoru motoru je umístěno v úzké drážce, motor se za provozu zahřívá a chvěje. K zemnímu spojení nejčastěji

dochází poškozením izolace vinutí. Další vývoj poruchy už záleží od vlastnosti sítě. Izolovaná síť se zemním proudem do 10 A zpravidla žádné větší škody nezpůsobí. Jiskřením v místě poruchy se bude stav poškozené izolace dále zhoršovat. Podobně tomu bude i v soustavě s kompenzační tlumivkou – omezení proudu pod 10 A většinou na 2 až 4 A činné složky proudu. Důsledky budou mírnější, než v předchozím případě. Kritické pro motor jsou rozsáhlé nekompenzované soustavy nebo soustavy uzemněné přes odporník, v obou případech zemní proudy dosahují až desítky A, to má za následek nejen poškození izolace, ale i statorových plechů, to představuje nákladnou opravu. Právě tady je nasazení zemní ochrany nezbytné. Doba do vypnutí, s ohledem na poškození železa musí být pod 1 s.

Zemní proudy se nejčastěji získávají:

- Součtem okamžitých hodnot fázových proudů
Výhoda je v jednoduchosti zapojení, v ušetřených nákladech za průvlekový měnič a za jeho dodatečnou montáž.
Nevýhoda je hlavně v tom, že chyby přístrojových transformátorů se projeví jako falešný proud I_0 . Tzn., že se musí volit vyšší nastavení a delší vypínací časy, nebo blokovat funkci zemní ochrany během startu motoru.
- Průvlekovým měničem – ochrana měří skutečný proud I_0 a může být nastavena citlivě a s krátkým vypínacím časem.

1.4.6 Ochrana při nesymetrii

Nesymetrie ve vinutí motoru není možná. Může vzniknout při poruše motoru, ale nejčastěji bývá nesymetrie způsobena harmonickými v síti. Zpětná složka je získána rozkladem z třífázové soustavy. Má opačný směr otáčení, než základní složka. Působí tedy proti směru otáčení motoru a zvyšuje ztráty motoru.

Ochrana má pro motory dva hlavní významy:

- Zabránit provozu motoru na dvě fáze (nesymetrie 58 %) – stav může nastat při poruše jednoho pólu vypínače, nebo při přerušení pojistky u motorů ovládaných stykačem
- Ochrana zároveň hlídá směr otáčení motoru, může tedy zabránit opačnému chodu ventilátoru nebo čerpadla, případně zničení drahého stroje.

1.4.7 Podpět'ová ochrana

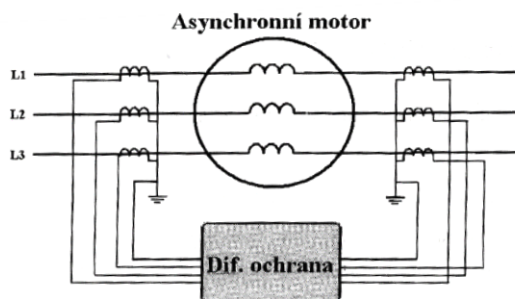
Při poklesu napětí klesá také moment a snižuje se rezerva přebytku momentu potřebná pro pohon. Mohlo by dojít až k zastavení motoru. Tomu je nutno předejít, a pokud podpětí trvá, ochrana motor odpojí. Při menším podpětí se většinou nejdříve odpojují méně důležité stroje, kvůli odlehčení sítě a zajištění chodu důležitých strojů. Pokud toto odpojení nestačí, musí se vypnout všechny stroje. Motory jsou navrženy tak, aby se naprázdno rozběhly ještě při podpětí $0,6 \times U_n$. V praxi se ale volí hodnota podpětí pro vypínání vyšší, a to $0,65$ až $0,7 \times U_n$ podle ČSN 38 1120. Další důležitou funkcí této ochrany je zajištění odpojení všech motorů od sítě při výpadku napětí tak, aby po jeho obnově nedošlo k automatickému spuštění motorů.

1.4.8 Podproudová ochrana

Jedná se o ochranu podproudovou nebo ochranu při snížení výkonu. Jejím hlavním úkolem je chránit technologii a nahlásit včas její poruchu. Ochrana nabíhá při poklesu proudu pod stanovený limit. Musí být zároveň vybavena funkcí, která zablokuje její působení v případě, kdy je motor vypnutý.

1.4.9 Diferenciální (rozdílová) ochrana

Tato ochrana je podle normy ČSN 33 3051 povinná pro motory od výkonu 6 MW. Doporučuje se, ale její použití již od výkonu 1 MW. Při dnešních vysokých cenách motorů se začíná používat stále častěji. Měníče na svorkách i v uzlu motoru mají stejný převod a stejný úhel. Porovnávají se tedy vždy dva stejné proudy. Ochrana může být nastavena velmi citlivě, běžné nastavení I_{dif} je 10 – 20 % I_n motoru. Při poruchách v motoru ochrana velmi rychle vypíná a dokáže tak zabránit velkým škodám. Při zkratech v sítích vn, přispívá motor do poruchy proudem přibližně 6 x I_n . Je důležité, aby v těchto případech diferenciální ochrana nezapůsobila.



Obr. 1.4.9 - diferenciální ochrana motoru

1.4.10 Požadavky na ochrany asynchronních motorů z pohledu ČSN 33 3051

Současná ČSN 33 3051 z roku 1992 Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení, která se jako jediná zabývá chráněním asynchronních motorů, je už zastaralá a nerespektuje dnešní moderní typy ochran.

Asynchronní motory se mají dle této normy vybavit následujícími ochranami:

- 1) **motory o výkonu $P \leq 1 \text{ MW}$**
 - nadproudová zkratová mžiková
 - nadproudová při přetížení (tepelný model)
 - podpěťová
- 2) **motory o výkonu $1 \text{ MW} < P \leq 6 \text{ MW}$**
 - nadproudová zkratová mžiková
 - nadproudová při přetížení (tepelný model)
 - podpěťová

- zemní
- nesouměrné zatížení
- ložisková

3) motory o výkonu $6 MW \leq P [MW]$

- nadproudová zkratová mžiková
- nadproudová při přetížení (tepelný model)
- podpěťová
- zemní
- nesouměrné zatížení
- ložisková
- zpětná wattová
- rozdílová

1.5 Ochrany transformátorů vn [1] [6] [7]

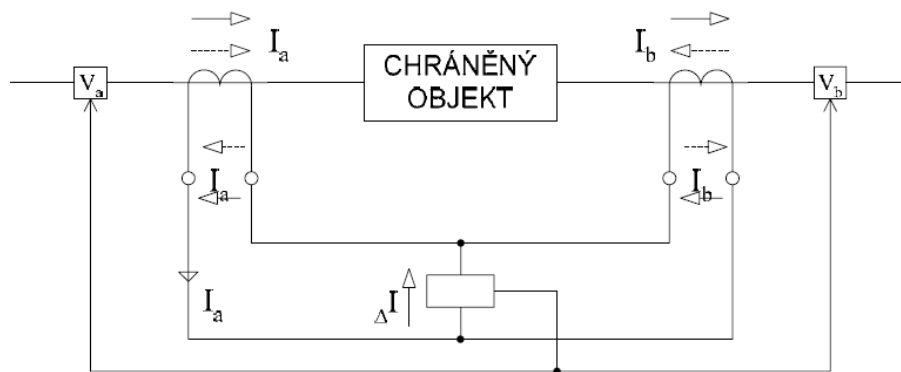
Poruchy transformátorů dělíme na:

- Průchozí poruchy – nastávají vlivem připojených zařízení. Působí většinou delší dobu, a přitom způsobují zvýšení teploty. Existují dva typy:
 - a) Přetížení – poruchový stav měří nadproudová ochrana proti přetížení (zachycuje závislá ochrana nebo tepelný obraz),
 - b) Vnější zkrat na připojeném objektu – poruchový stav měří nezávislá nadproudová ochrana.
- Vnitřní poruchy – člení se na dvě skupiny:
 - a) Poruchy objevující se náhle – zkraty na svorkách, zkraty na vinutí, zkraty mezi vinutími, zkraty vinutí na nádobu (zachycuje ochrana rozdílová, nadproudová, nádobová, srovnávací, distanční a plynové relé),
 - b) Poruchy projevující se pozvolna – špatné galvanické styky, špatná izolace plechů, vznikající mikrooblouky v nádobě transformátoru, poruchy chlazení (může zachytit v počáteční fázi pouze plynové relé). [1]

Rozdílovou ochranu, plynové relé a nádobovou ochranu, můžeme řadit mezi základní ochrany, neboť se vyznačují rychlým působením při vnitřních poruchách. Vnější zkraty mimo transformátor, musí vypínat ochrana, do jejíž kompetence porucha patří. Při jejím selhání pak může dojít k nadměrnému přetížení transformátoru průchozím proudem, a proto ochrany základní musíme doplnit ochranou záložní, působící se zpožděním nutným pro dodržení selektivního vypínání. Jako záložní ochrany můžeme použít proudovou zkratovou ochranu, ochranu proti přetížení a distanční (impedanční) ochranu, kterou se obvykle chrání transformátory velkých výkonů vvn/vvn. Pokud lze na ochraně proti přetížení nastavit tepelný obraz transformátoru (termokopii), měla by být tato ochrana řazena spíše do skupiny základních ochran. [7]

1.5.1 Rozdílová ochrana

Princip funkce rozdílové ochrany je v měření proudu na obou koncích chráněného transformátoru. Z rozdílu těchto veličin rozpozná poruchu uvnitř chráněného objektu, a je-li tento rozdílový proud větší než nastavený, odpojí transformátor na primární i sekundární straně. Pro normální provoz platí, že rozdílový proud získaný součtem všech porovnávaných proudů ze vstupu a výstupu chráněného objektu, je roven nule. [1]



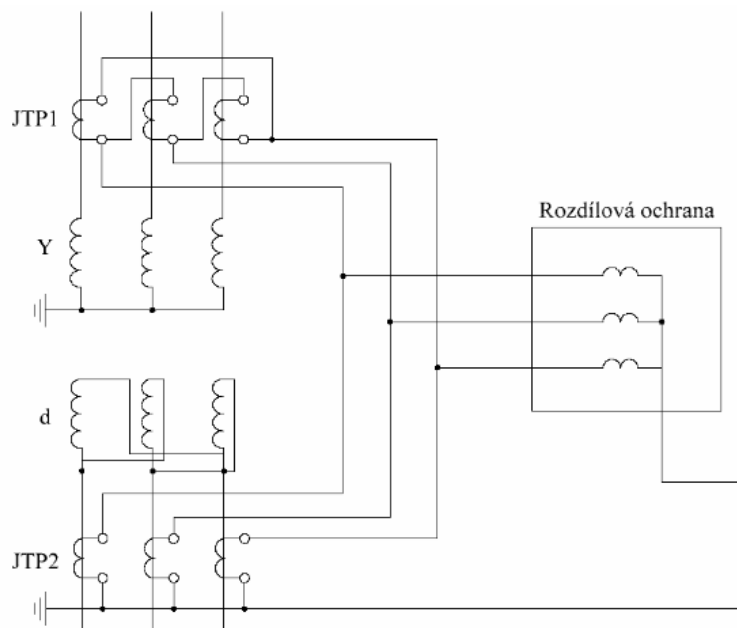
Obr. 1.5.1a - zapojení rozdílové ochrany transformátoru [7]

Za normálního provozu jsou primární proudy I_a , I_b stejné. Při vhodně volených převodech jistících transformátorů proudu jsou stejné i proudy sekundární (plné šipky). Rozdílový proud $\Delta I = 0$. Při poruše uvnitř chráněného objektu obrací se směr proudu I_b , jak je naznačeno v obrázku čárkovanými šipkami. Rozdílový proud tekoucí měřicím členem (relé) pak způsobí jeho náběh a vypnutí vypínačů na obou koncích chráněného objektu.

Použitý měřicí člen bývá proudový, s nízkou impedancí a s nastavitelnou citlivostí. [7]

U starších typů rozdílových ochrany (tzn. u všech mimo digitálních) byl problém s výběrem vhodných měřicích transformátorů. Správným výběrem byla značně ovlivněna citlivost ochrany. Při nevhodně zvoleném převodu, a pokud neměly měřicí transformátory na primáru a sekundáru stejnou charakteristiku, hrozilo nebezpečí, že při průchozích zkratech dojde k falešnému působení rozdílové ochrany. Tento problém u moderních digitálních ochrany nehrozí, za to se ale vyžaduje vyšší skutečné nadproudové číslo měřicích transformátorů. [1]

Moderní diferenční ochrana si dokáže také poradit při různém hodinovém úhlu spojení vinutí silového transformátoru (nejčastěji spojení Y/d), kde musíme u starších typů (elektromechanických) diferenčních ochrany kromě sladění převodů transformátorů proudu provést i vyrovnání jejich fázového natočení – viz obr. 1.5.1b. Používá se jednoduché zásady a to, že skupina jistících transformátorů na jedné straně má spojení sekundárních vinutí stejné jako silový transformátor na straně protější. Spojení sekundárních vinutí transformátorů proudu je tedy zrcadlovým obrazem spojení vinutí silového transformátoru. [7]



Obr. 1.5.1b - rozdílová ochrana s vyrovnáním hodinového úhlu PTP při zapojení Y/D [7]

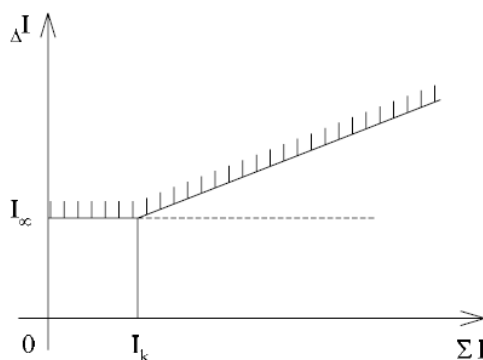
Pro zajištění selektivity musí být ochrana vybavena blokováním při zapínacím nárazu. Při zapínání transformátoru totiž vznikají velké proudové rázy, které dosahují 6 až 10 násobku I_n transformátoru. Zapínací náraz působí na rozdílovou ochranu jako vnitřní porucha. Blokování se dnes nejčastěji realizuje filtry na druhou harmonickou, která tvoří podstatnou složku průběhu magnetizačního zapínacího proudu. Při výskytu druhé harmonické se pomocí těchto filtrů zmenšuje citlivost nebo blokuje ochrana. [1]

Kompenzace rozdílových měřicích členů

Aby rozdílová ochrana nepůsobila chybně při zkratech mimo chráněný objekt (vnější – průchozí zkrat), musí být splněna podmínka, že proudy sekundárního vinutí jistících transformátorů proudu jsou při bezporuchovém chodu chráněného objektu na obou koncích stejné co do velikosti i fáze. Proto oba jistící transformátory proudu musí mít vhodně navržený převod, a pokud možno stejný průběh chyby při nadproudech. Tato podmínka se obtížně dodrží v případě chránění výkonových transformátorů, neboť převody jistících transformátorů proudu musí být sladěny s převodem výkonového transformátoru s přihlédnutím i ke způsobu zapojení jeho vinutí. Obzvláště nepříznivé poměry vznikají u regulačních transformátorů. Změní-li se při regulaci napětí např. převod o 10%, vzniká v rozdílovém měřicím členu rozdílový proud 10% průchozího proudu silovým transformátorem. Při jmenovitém zatížení je to tedy 10% jmenovitého proudu. Je-li rozdílový měřicí člen nastaven na proud větší než 10% jmenovitého proudu, pak nepůsobí. Stačí však, aby při vnějším zkratu (zkratu mimo chráněný transformátor) dosáhl zkratový proud hodnoty např. $5 I_n$. Pak rozdílový proud může překročit nastavenou hodnotu na měřicím rozdílovém členu, a ten pak chybně působí.

Proto při konstrukci rozdílových ochran se počítá s tím, že rozdílový proud tekoucí měřicím rozdílovým členem při normálním, bezporuchovém provozu a vnějších zkratech není možné vždy odstranit, ani zmenšit na vhodnou velikost. Pro působení rozdílových ochran platí kritérium, že

ochrana nesmí působit, nepřestoupí-li vyrovnávací proud určité procento celkového průchozího proudu. Je-li tato hodnota překročena, znamená to, že jde již o vnitřní poruchu chráněného objektu. Z uvedených důvodů je nutné provést kompenzaci měřících rozdílových členů. Velikost kompenzace se odvozuje od velikosti průchozího proudu chráněným objektem. Moderní ochrany mají charakteristiky ve tvaru lomené čáry – viz., obr. 1.5.1c. Sklon charakteristiky od bodu I_k závisí na velikosti nárůstu rozdílového proudu při vnějších zkratech. Tento by neměl protnout nakreslenou charakteristiku. Někteří výrobci zajišťují dokonce i charakteristiku dvojité lomenou. [7]

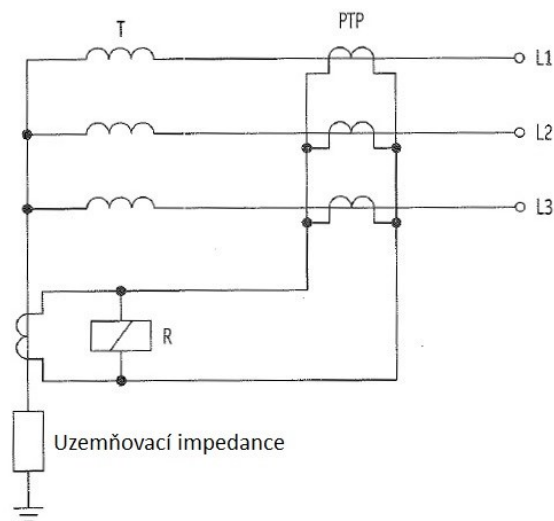


Obr. 1.5.1c - charakteristika rozdílové kompenzované ochrany [7]

1.5.2 Zemní ochrana

Zemní ochrana vinutí zapojených do hvězdy

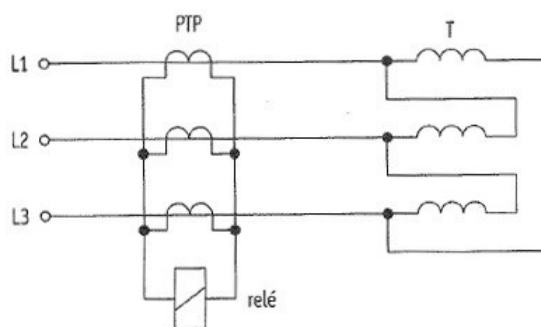
Zemní ochrana patří skupiny proudových rozdílových ochran. Jak již bylo uvedeno v předcházející kapitole, není možné použít extrémně nízké nastavení rozdílové ochrany, protože se mohou vyskytnout případy, při kterých by ochrana působila i při normálním provozu transformátoru. Velikost úseku vinutí, které jsou chráněny rozdílovou ochranou v případě zemních poruch, závisí od metody uzemnění sítě. Pokud je použito účinné uzemnění, potom pomocí rozdílové ochrany s nastavením 20 % je chráněné vysoké procento vinutí. Pokud je, ale použita uzemňovací impedance na omezení poruchového proudu při vnějších zemních poruchách, potom při zemní poruše na části vinutí v blízkosti uzemněného konce, budou téct takové malé rozdílové proudy, které nebudou stačit na působení ochrany. Toto chování je v mnoha případech neakceptovatelné, a proto se na vinutí zapojeném do hvězdy používá zemní ochrana podle obr. 1.5.2a. Ochrana využívá čtyři proudové transformátory se stejnými převody. Jeden je zapojený v uzemněném uzle a ostatní jsou zapojené ve fázových vinutích. [6]



Obr. 1.5.2a - Rozdílová zemní ochrana transformátoru na vinutí zapojeném do Y [6]

Zemní ochrana vinutí zapojených do trojúhelníku

Na vinutích zapojených do trojúhelníku, připojených na síť s uzemněným transformátorem nebo uzemněným nulovým bodem, může vzniknout zemní porucha. V takovém to případě budou téct dost velké proudy, protože všechny body vinutí mají nejméně napětí rovno polovině fázové hodnoty. Takovéto poruchy by měla identifikovat proudová rozdílová ochrana. Napříč tomu, se ale často používá oddělená zemní ochrana pro vinutí zapojená do trojúhelníku, jak ukazuje obr. 1.5.2b.



Obr. 1.5.2b - Rozdílová zemní ochrana transformátoru na vinutí zapojeném do D [6]

Použité jsou tři proudové transformátory s primárními vinutími zapojenými na přívodní vodiče vinutí transformátoru. Může se použít buď relé s vysokou impedancí nebo relé s procentuálním omezením s nastavením 20 % I_n nebo méně. Ochrana bude reagovat na zemní poruchy na chráněném vinutí, protože suma tří fázových proudů ze sítě se za těchto podmínek nebude rovnat nule. Nebude reagovat na poruchy vzniklé na přidružené síti, protože zapojení do trojúhelníku nemůže poskytovat netočivou složku a součet ostatních složek proudu dává nulovou hodnotu, tj. suma síťových proudů se musí vždy rovnat nule, pokud ne je porucha na vinutí. [6]

1.5.3 Ochrana při přetížení transformátoru

Jako ochrana přetížení transformátoru se dá použít teploměr sledující oteplení transformátoru, závislá nebo nezávislá proudová ochrana, sledující zatížení transformátoru. [1]

Okamžité teploty uvnitř transformátoru nejsou závislé výhradně od proudu protékajícího jeho vinutími, ale také se zvyšují při nedostatečné cirkulaci oleje způsobené chybnými čerpadly nebo zablokovaným potrubím. Lokální nebo celkové přehřátí může vzniknout dokonce, i když jsou transformátory málo zatěžovány. Proto se při určení přehřívání nemůžeme spolehnout jen na použití nadproudových ochranných, ale použijí se i teploměry nebo teplotní snímače.

Kdysi se používali teplotní snímače, které byli umístěné v oleji uvnitř vinutí transformátoru. V současnosti se v běžné praxi instalují teplotní snímací prvky umístěné v malé komoře blízko stropu transformátorové nádoby, kde je olej nejteplejší. Také je tam umístěný malý ohřívač, který je napájený proudovým transformátorem zapojeným na jednom fázovém vinutí. Lokální teplota oleje v komoře je tak porovnatelná s teplotou hlavních vinutí. Jako snímače jsou použity na teplo citlivé rezistory zapojené do můstku, který vytváří rozdílový výstupní signál, buď pro signalizaci nebo působící na vypínače příslušných obvodů, které způsobují nepříjemné přehřívání.

Protože životnost izolace závisí na provozní teplotě, a také na čase provozu při této teplotě, byli vyvinuté ochrany označované jako teplotně – časové integrátory, které měří dobu, při které transformátor pracuje v určitém rozsahu teplot, např. počet hodin, při kterých byl transformátor v provozu při teplotě v rozsahu 100 až 110 °C. Z takovéto informace se dá odhadnout stupeň stárnutí izolace v transformátoru. [6]

1.5.4 Tepelná funkce

Tepelná funkce hlídá chráněný objekt proti nepovolenému nadměrnému oteplení, které je způsobeno vyšším proudem, než je dovolené zatížení. Oteplení je modelováno na principu ovlivňování tepelného modelu chráněného objektu proudem, který tímto objektem protéká. Tepelná funkce může být na rozdíl od ochrany proti přetížení použita u strojů všech výkonů a jakékoli tepelné kapacity. Ochrana monitoruje oteplení, a ne absolutní teplotu. Okolní teplota, stejně jako účinnost chladicího systému, nikterak neovlivňují funkci ochrany. Nárůst oteplení z počáteční hodnoty na hodnotu konečnou, je výsledkem změny proudu a závisí na jedné nebo na několika exponenciálních funkcích. Vliv jednotlivých materiálů na oteplení je definován jejich tepelnou odezvou. Např. transformátorový olej, jako jedna z exponenciálních funkcí, se uplatňuje výrazněji, než ostatní funkce (chladicí voda, materiál vinutí atd.) [1]

1.5.5 Proudová zkratová ochrana

Jako zkratovou ochranu transformátoru lze použít trojfázovou zpožděnou nadproudovou ochranu. Pro zvýšení selektivity se tato ochrana, pokud je na primární straně, někdy doplňuje podpěťovým blokováním ze sekundární strany. Velmi často se používá směrová zkratová ochrana, a to tam, kde jsou na sekundární stranu transformátoru připojeny významné zdroje zkratových příspěvků. [1]

1.5.6 Srovnávací ochrana

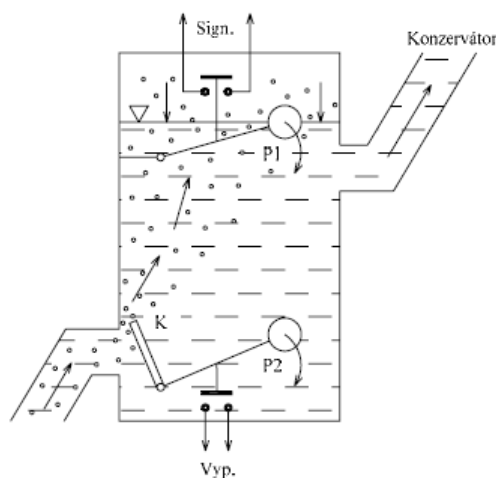
Jako ochrana transformátoru se používá výjimečně, avšak jako společná ochrana transformátoru a vedení (volné nebo kabelové) je v hodná. Musí být necitlivá na zapínací náraz, její působení se blokuje frekvenční ochranou, která vyhodnotí, zda jde o zapínací ráz nebo o zkrat. [1]

1.5.7 Plynové relé

Plynové relé (někdy též nazývané Buchholzovo relé) se používá u transformátorů s olejovým chlazením. Zapojuje se do potrubí mezi nádobou transformátoru a konzervátorem. Princip působení plynového relé znázorňuje obr. 1.5.7.. Při vnitřním zkratu transformátoru nastává vlivem tepla oblouku, anebo ohřátého vodiče rozklad a destilace transformátorového oleje. Z oleje se uvolňuje vodík, metan kyslíčník uhelnatý a uhličitý, dusík a další plyny. Poruchy doprovázené vývojem plynů se buď signalizují, anebo při rychlém vývinu plynů se provádí vypnutí transformátoru. Plynové relé má tedy dva stupně působení:

1. stupeň - spíná plovák P1 a je použit k signalizaci, že došlo k pomalému vývinu plynů, případně k menšímu úniku oleje z nádoby.

2. stupeň - reaguje na rychlý vývin plynů a proudění oleje do konzervátoru při vnitřních zkratech. Toto zachytí nejdříve klapka K a plovák P2, čímž dochází k propojení vypínacího obvodu. [7]

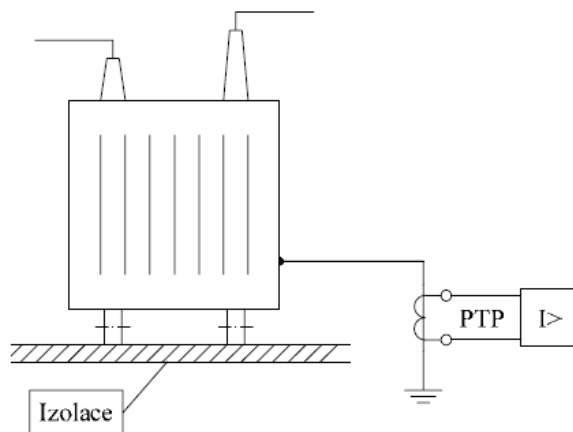


Obr. 1.5.7 - princip plynového relé [7]

1.5.8 Nádobová (kostrová) ochrana

Transformátor je umístěn na izolační podložce. Kostra transformátoru (nádobka) je spojena se zemnicí soustavou transformovny vodičem, který prochází průvlekovým transformátorem proudu. Při přeskočení na průvlečkách nebo na vinutí na nádobách protéká proud přes průvlekový transformátor do země a proudová ochrana provádí vypnutí. Aby nedošlo k chybnému působení,

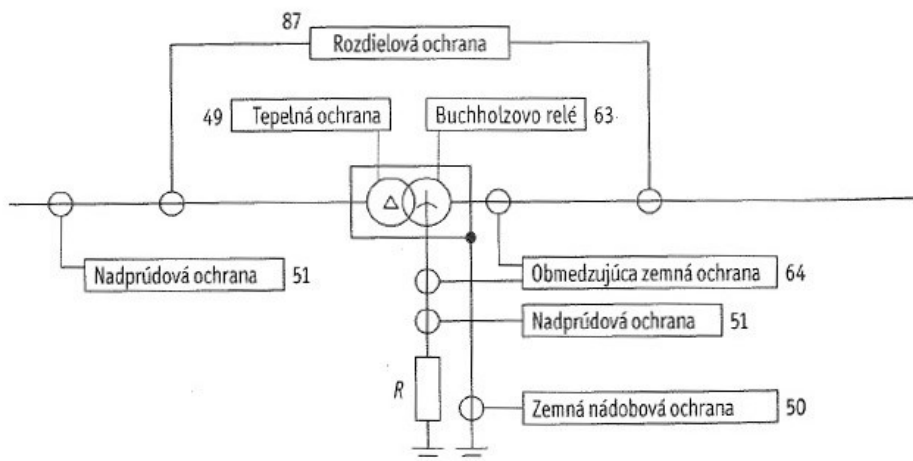
musí procházet všechny kabely pomocných obvodů (ventilátory, osvětlení, dálková regulace přepínání odboček aj.) přes průvlekový transformátor proudu. [7]



Obr. 1.5.8 - nádobová ochrana [7]

1.5.9 Digitální ochrana třífázového transformátoru

Na obr. 1.5.9 je znázorněné typické uspořádání výše popsaných ochran transformátoru, které bude poskytovat komplexní ochranu velkých transformátorů. [6]



Obr. 1.5.9 - funkce chránění digitální ochrany transformátoru [6]

1.5.10 Požadavky na ochrany síťových transformátorů z pohledu ČSN 33 3051

Druh ochrany	Transformátor zvn/vn; vvn/vn; vn/vn; vn/nn				Transformátor zvn/vvn vvv/vvn
	Výkon S [MV . A]				
	$S < 1,7$	$1,7 \leq S < 5$	$5 \leq S < 25$	$25 \leq S$	
Nadproudová zkratová nebo impedanční (primární)	X	X	X	X	X
Nadproudová zkratová (sekundární)	X	X	X	X	X
Nadproudová zkratová (terciální)	X	X	X	X	(X ²)
Nadproudová při přetížení		X	X	X	X
Plynová		X	X	X	X
Rozdílová		X ¹⁾	X ¹⁾	X	X
Zemní nádobová			X	X	X
Tepelná ochrana				(X)	(X)
Rozdílová odbočky (primární)					X
Rozdílová odbočky (sekundární)					X
Impedanční 1 (sekundární)					X
Impedanční 2 (sekundární)					X
Poznámka – použité značení v tabulce (X) ochrana se doporučuje X ochrana se použije					

Tab. 1.5.10 Síťové transformátory a jejich odbočky – vybavení ochranami [5]

Vysvětlivky k tabulce 1.5.10:

¹⁾ Pouze tehdy, jestliže nevyhoví časové nastavení nadproudové časově nezávislé ochrany a nemůže být (např z důvodu selektivity) použita nadproudová mžiková ochrana.

²⁾ Pro chránění odbočky od terciálního vinutí transformátoru zvn(vvn)/vvv/vn se použije dvoustupňová ochrana, doplněná logickou ochranou pro urychlení působení ochrany. Druhý stupeň je nastaven na vyšší proud a kratší čas.

2. Teoretický rozbor výpočtu zkratových proudů [4] [8]

2.1 Předpoklady a postup pro výpočet

Norma zavádí tyto předpoklady pro výpočet:

Obecně pro výpočet maximálních i minimálních zkratových proudů vychází z těchto zjednodušení:

- Po dobu trvání zkratového proudu se nemění druh zkratu.
- Po dobu zkratu nedochází k žádné změně v síti.
- Uvažují se impedance transformátorů pro přepínače odboček v základní poloze (to je přípustné, protože je zaveden korekční součinitel pro impedance K_T pro síťové transformátory).
- Odpory oblouku se neuvažují.
- Všechny kapacity vedení a paralelní admitance a netočivé statické zátěže jsou zanedbány, vyjma paralelních admitancí v netočivé soustavě.
- Pokud se počítají zkratové proudy v soustavách s rozdílnými hladinami napětí, je nutné přepočítat hodnoty impedancí z napěťové hladiny na tu, ve které se má určit zkratový proud. Impedance zařízení v sítích vyšších a nižších napětí musí být vyděleny nebo vynásobeny čtvercem jmenovitého převodu transformátoru t_r .

Zvlášť pro maximální zkratové proudy:

- Musí se použít napěťový součinitel c_{max} podle tab. 2.1.
- Vybrat konfiguraci soustavy a maximální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k maximální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu.
- Pokud je použita ekvivalentní impedance Z_Q , jako reprezentující vnější síť, musí se použít minimální ekvivalentní zkratová impedance, která odpovídá maximálnímu příspěvku zkratových proudů od síťových napáječů.
- Rezistence R_{L20} vedení (venkovních vedení a kabelů) při teplotě 20°C .
- Motory musí být zahrnuty podle potřeby.

Pro výpočet minimálních zkratových proudů:

- Musí se použít napěťový součinitel c_{min} podle tab. 2.1
- Vybrat konfiguraci soustavy a minimální příspěvky z elektráren a síťových napáječů tak, aby vedly k minimální hodnotě zkratového proudu v místě zkratu
- Motory musí být zanedbány
- Rezistence R_L vedení (venkovních vedení a kabelů, vodičů a středních vodičů) se musí uvažovat při nejvyšší teplotě: $R_L = [1 + \alpha(\theta_e - 20^\circ\text{C})] \cdot R_{L20}$
kde R_{L20} je rezistence při teplotě 20°C
 θ_e je teplota vodiče ve stupních Celsia na konci zkratu
 α součinitel rovný $0,004/\text{K}$, platný pro měď, hliník a slitiny hliníku.

Tabulka součinitele c_{\min} a c_{\max} pro výpočet min. a max. zkratových proudů metodou ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu.

Jmenovité napětí U_n	Napět'ový součinitel c pro výpočet	
	maximálních zkratových proudů $c_{\max}^{1)}$	minimálních zkratových proudů c_{\min}
Nízké napětí 100 V až 1 000 V (IEC 60038, tabulka I)	$1,05^{3)}$ $1,10^{4)}$	0,95
Vysoké napětí > 1 kV až 35 kV (IEC 60038, tabulka III)	1,10	1,00
Velmi vysoké napětí ²⁾ > 35 kV (IEC 60038, tabulka IV)		

¹⁾ $c_{\max}U_n$ by neměl překročit nejvyšší napětí U_m pro zařízení energetických soustav.

²⁾ Pokud není jmenovité napětí definováno potom $c_{\max}U_n = U_m$ nebo $c_{\min}U_n = 0,90 \times U_m$.

³⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +6 %, například pro soustavy přecházející z 380 V na 400 V.

⁴⁾ Pro soustavy nízkého napětí s tolerancí +10 %.

Tab. 2.1 Napětový součinitel c

Postup při výpočtu zkratových proudů:

- Sestavení schématu dané soustavy – parametry uvažovaných prvků vztahujeme k jejich jmenovitému výkonu a napětí
- Sestavení náhradního schématu soustavy – pro souměrné zkraty pouze náhradní schéma sousledné složky, pro nesouměrné zkraty náhradní schéma sousledné, zpětné i nulové složky
- Stanovení zkratové impedance všech prvků náhradních schémat
- Pro každý složkový systém se určí jeho impedance, vztažená k místu zkratu
- Metodou ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu se určí výpočtem počáteční rázový zkratový proud, nárazový zkratový proud, ekvivalentní oteplovací proud a vypínací zkratový proud.

2.2 Zkratové impedance elektrických zařízení

2.2.1 Všeobecné předpoklady

- U výpočtu souměrných trojfázových zkratů je jedinou uvažovanou impedancí impedance sousledná $\underline{Z}_{(1)}$
- U elektricky vzdálených zkratů obecně dovoleno uvažovat $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$

- U síťových napáječů, transformátorů, venkovních vedení, kabelů, reaktorů a podobného zařízení jsou si také sousledná a zpětná zkratová impedance soustavy rovny: $\underline{Z}_{(1)} = \underline{Z}_{(2)}$.
- Pokud se zkratové proudy počítají pomocí ekvivalentního napětového zdroje v místě zkratu, musí se impedance generátorů (G), síťových transformátorů (T) a elektrárenských bloků (S) vynásobit impedančními korekčními součiniteli K_G , K_T , K_S nebo K_{SO} .

2.2.2 Síťové napáječe

Sousledná zkratová impedance:

- a) Zkrat napájen ze sítě bez transformátoru

Známe-li pouze I''_{kQ} v bodě připojení napáječe Q , potom se Z_Q určí:

$$Z_{(1)Q} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}}$$

- b) Zkrat napájen transformátorem ze sítě vn, nebo vvn a zvn

Známe-li pouze I''_{kQ} v bodě připojení napáječe Q , potom se Z_Q vztažená ke straně transformátoru s nižším napětím určí:

$$Z_{(1)Qt} = \frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I''_{kQ}} \cdot \frac{1}{t_r^2}$$

2.2.3 Transformátory

1) Dvouvinutové transformátory

Sousledná zkratová impedance:

$$\underline{Z}_{(1)T} = R_T + jX_T$$

- nebo ze štítkových údajů:

$$Z_{(1)T} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}}$$

$$R_T = \frac{u_{Rr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rT}^2}{S_{rT}} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rT}^2}$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2}$$

- k takto vypočteným impedancím se musí zavést korekční součinitel K_T :

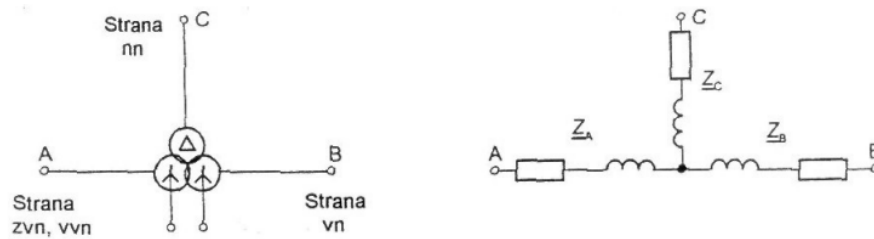
$$\underline{Z}_{(1)TK} = K_T \cdot \underline{Z}_{(1)T}$$

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_T}$$

kde x_T je poměrná reaktance transformátoru $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$.

- tento korekční součinitel K_T se nesmí použít pro blokové transformátory.

2) Trojvinut'ové transformátory



Obr. 2.2.3b - označení zapojení vinutí a náhradní schéma sousledné složkové soustavy

- výpočet pomocí tří zkratových impedancí (vztažených na stranu A transformátoru):

$$\underline{Z}_{(1)AB} = \left(\frac{u_{RrAB}}{100\%} + j \frac{u_{XrAB}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAB}}$$

$$\underline{Z}_{(1)AC} = \left(\frac{u_{RrAC}}{100\%} + j \frac{u_{XrAC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTAC}}$$

$$\underline{Z}_{(1)BC} = \left(\frac{u_{RrBC}}{100\%} + j \frac{u_{XrBC}}{100\%} \right) \cdot \frac{U_{rTA}^2}{S_{rTBC}}$$

$$u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2}$$

sousledné zkratové impedance:

$$\underline{Z}_{(1)A} = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{(1)AB} + \underline{Z}_{(1)AC} - \underline{Z}_{(1)BC})$$

$$\underline{Z}_{(1)B} = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{(1)BC} + \underline{Z}_{(1)AB} - \underline{Z}_{(1)AC})$$

$$\underline{Z}_{(1)C} = \frac{1}{2} \cdot (\underline{Z}_{(1)AC} + \underline{Z}_{(1)BC} - \underline{Z}_{(1)AB})$$

u transformátorů s přepínačem odboček při zatížení a bez něho se korekční součinitelé mohou určit:

$$K_{TAB} = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TAB}}$$

$$K_{TAC} = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TAC}}$$

$$K_{TBC} = 0,95 \cdot \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_{TBC}}$$

Nulová složka zkratové impedance se u obou typů transformátoru určuje podle zapojení vinutí, a podle konstrukce transformátoru.

2.2.4 Venkovní vedení a kabely

Sousledná zkratová impedance:

$$\underline{Z}_{(1)L} = R_{(1)} + jX_{(1)}$$

- hodnotu $R_{(1)}$ a $X_{(1)}$ můžeme vypočítat z tabulkových hodnot udávaných výrobcem na jednotku délky (R_K a X_K), potom platí:

$$R_{(1)} = R_K \cdot l$$

$$X_{(1)} = X_K \cdot l$$

- lze také vypočítat z parametrů vodiče (průřezy a rozteče vodičů)
- činná rezistance na jednotku délky R'_L venkovních vedení při teplotě vodiče 20°C, lze vypočítat z jmenovitého průřezu q_n a rezistivity ρ :

$$R'_L = \rho / q_n$$

$$\text{pro měď } \rho = \frac{1}{54} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{pro hliník } \rho = \frac{1}{34} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$$

$$\text{pro slitinu hliníku } \rho = \frac{1}{31} \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}}$$

- reaktanci na jednotku délky X'_L pro venkovní vedení je možné vypočítat za předpokladu, že je provedena transpozice vedení ze vzorce:

$$X'_L = 2\pi f \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right) = f \mu_0 \left(\frac{1}{4n} + \ln \frac{d}{r} \right)$$

$d = \sqrt[3]{d_{L1L2} \cdot d_{L2L3} \cdot d_{L3L1}}$ geometrická střední vzdálenost mezi vodiči či středem svazků;

r poloměr jednoduchého vodiče;

n počet vodičů ve svazku; pro jednoduchý vodič $n = 1$;

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

Pokud není nulová složka udána výrobcem, je nutno ji zjistit měřením nebo složitějším výpočtem.

2.2.5 Reaktory omezující zkratový proud

Sousledné, zpětné a netočivé zkratové impedance jsou stejné za předpokladu geometrické souměrnosti.

$$Z_{(1)R} = Z_{(2)R} = Z_{(0)R} = \frac{u_{kR}}{100\% \sqrt{3} \cdot I_{rR}} \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_{rR}}$$

u_{kR} a I_{rR} jsou uvedeny na štítku reaktoru.

2.2.6 Synchronní generátory

Sousledná zkratová impedance:

- při výpočtu I_k'' v soustavách napájených přímo z generátorů bez blokových transformátorů, například v průmyslových sítích nebo nízkonapěťových sítích platí:

$$\underline{Z}_{GK} = K_G \cdot \underline{Z}_G = K_G (R_G + jX_d'')$$

- korekčním součinitelem:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{rG}} \cdot \frac{c_{max}}{1 + x_d'' \cdot \sin \varphi_{rG}}$$

U_{rG} jmenovité napětí generátoru;

Z_{GK} korigovaná impedance generátoru;

Z_G rázová impedance generátoru v sousledné soustavě:

$$\underline{Z}_G = R_G + jX_d''$$

φ_{rG} fázový úhel mezi I_{rG} a $U_{rG} / \sqrt{3}$;

x_d'' poměrná rázová reaktance generátoru vztažená ke jmenovité impedanci:

$$x_d'' = X_d'' / Z_{rG} \text{ kde } Z_{rG} = U_{rG}^2 / S_{rG}.$$

- pro fiktivní rezistance R_{Gf} norma dovoluje použít:

$$R_{Gf} = 0,05 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} \geq 100 \text{ MVA}$$

$$R_{Gf} = 0,07 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} > 1 \text{ kV a } S_{rG} < 100 \text{ MVA}$$

$$R_{Gf} = 0,15 X_d'' \text{ pro generátory s } U_{rG} \leq 1000 \text{ V}$$

2.2.7 Asynchronní motory

Příspěvek motorů vn se musí zahrnout do výpočtu maximálního zkratového proudu. Příspěvek motorů nn se musí zahrnout do výpočtu ve vlastní spotřebě elektráren a v průmyslových a podobných rozvodech. Příspěvek asynchronních motorů v nízkonapěťové soustavě ke zkratovému proudu I_k'' se může zanedbat, jestliže tento příspěvek není větší, než 5% počátečního zkratového proudu I_{kM} , vypočítaného bez příspěvku těchto motorů. Lze také zanedbat ty motory vn a nn, které s ohledem na schéma zapojení (blokování) nebo funkci (reverzní pohony armatur) nejsou zároveň v provozu.

Sousledná zkratová impedance:

$$\underline{Z}_{(1)M} = R_M + jX_M$$

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

U_{rM} jmenovité napětí motoru;

I_{rM} jmenovitý proud motoru;

S_{rM} jmenovitý zdánlivý příkon motoru [$S_{rM} = P_{rM}/(\eta_{rM} \cos \varphi_{rM})$];

I_{LR}/I_{rM} poměr záběrného proudu ke jmenovitému proudu motoru při zabrzděném motoru.

Pokud je znám R_M/X_M , pak X_M se vypočítá:

$$X_M = \frac{Z_M}{\sqrt{1 + (R_M/X_M)^2}}$$

Pokud nejsou známy hodnoty R_M a X_M ani poměr R_M/X_M lze použít:

$R_M/X_M = 0,10$, s $X_M = 0,995$. Z_M pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů ≥ 1 MW;

$R_M/X_M = 0,15$, s $X_M = 0,989$. Z_M pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů < 1 MW;

$R_M/X_M = 0,42$, s $X_M = 0,922$. Z_M pro skupiny nízkonapěťových motorů včetně připojovacích kabelů.

Motory nn jsou obvykle připojeny k přípojnici pomocí kabelů o různých délkách a průřezech. Pro zjednodušení výpočtu je možné skupiny motorů včetně jejich napájecích kabelů zahrnout do ekvivalentního motoru. Pro tyto motory pak lze použít:

$$Z_M = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}}{\sqrt{3}I_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}}$$

I_{rM} součet jmenovitých proudů všech motorů ve skupině motorů;

$I_{LR}/I_{rM} = 5$;

$R_M/X_M = 0,42$, případně $\kappa_M = 1,3$;

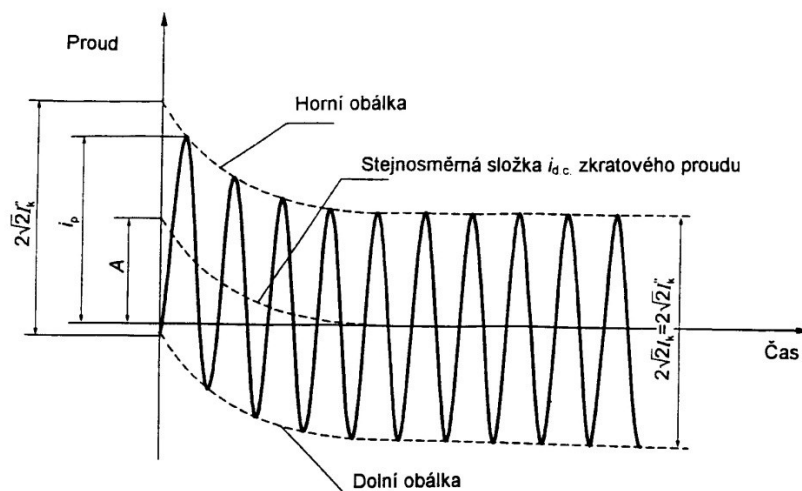
Nulová složka zkratové impedance závisí na konstrukci stroje, proto ji výhradně určujeme z výrobní dokumentace nebo měřením.

2.3 Výpočet zkratových proudů

2.3.1 Definice základních pojmů

- *předpokládaný zkratový proud*: proud, který by protékal obvodem, kdyby byl zkrat nahrazen ideálním spojením se zanedbatelnou impedancí bez změny napájení
- *souměrný zkratový proud*: efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu se zanedbanou eventuální aperiodickou složkou proudu

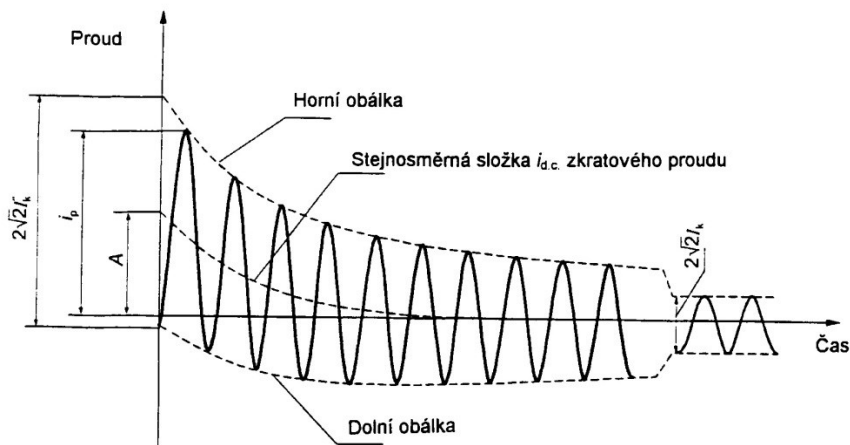
- *počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''* : efektivní hodnota střídavé souměrné složky předpokládaného zkratového proudu v okamžiku vzniku zkratu, při konstantní impedanci; je to přechodný střídavý proud, vznikající v prvním okamžiku po zkratu, když napětí má ještě původní hodnotu a odpor se už zmenšil zkratem; jeho hodnota má rozhodující vliv při volbě velikosti vypínačů a jističů v elektrickém zařízení
- *počáteční souměrný rázový zkratový výkon S_k''* : pomyslná hodnota definovaná jako součin počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' , jmenovitého napětí sítě U_n a součinitele $\sqrt{3}$: pak tedy bude $S_k'' = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_k''$
- *stejnoseměrná (aperiodická) složka $i_{d.c.}$ zkratového proudu*: střední hodnota horní a dolní obalové křivky průběhu zkratového proudu, klesající ze své počáteční hodnoty k nule
- *nárazový zkratový proud i_p* : maximální možná okamžitá hodnota předpokládaného zkratového proudu; je směrodatný pro určení mechanického namáhání částí obvodu; maximální hodnoty může dosáhnout v čase 0,01 s po vzniku zkratu
- *ustálený zkratový proud I_k* : efektivní hodnota zkratového proudu, který zůstává po odeznění přechodného jevu
- *ekvivalentní oteplovací proud I_{th}* : efektivní hodnota proudu, který má stejné tepelné účinky a stejnou dobu trvání, jako skutečný zkratový proud, který může obsahovat stejnosměrnou složku a s časem se mění
- *elektricky vzdálený zkrat*: zkrat, při kterém velikost souměrné složky předpokládaného zkratového proudu zůstává v podstatě konstantní



Obr. 2.3.1a - zkratový proud elektricky vzdáleného zkratu s konstantní střídavou složkou

- *elektricky blízký zkrat*: zkrat, při kterém příspěvek alespoň jednoho synchronního stroje k předpokládanému počátečnímu souměrnému rázovému zkratovému proudu překračuje dvojnásobek jmenovitého proudu stroje, nebo zkrat, při kterém příspěvek asynchronních

motorů překračuje 5% počátečního souměrného rázového zkratového proudu I_k'' bez motorů



Obr. 2.3.1b - zkratový proud elektricky blízkého zkratu s klesající střídavou složkou

2.3.2 Počáteční souměrný rázový zkratový proud I_k''

- trojfázový zkrat:

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}|Z_{(1)}|}$$

- dvoufázový zkrat:

$$I_{k2}'' = \frac{cU_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)}|} = \frac{cU_n}{2|Z_{(1)}|} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_k''$$

- jednofázový zkrat:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|Z_{(1)} + Z_{(2)} + Z_{(0)}|}$$

2.3.3 Nárazový zkratový proud i_p

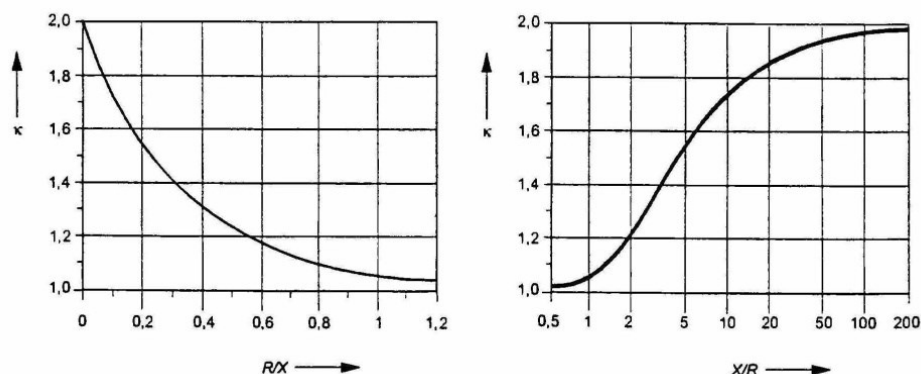
- trojfázový zkrat:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$$

Součinitel κ pro poměr R/X nebo X/R se vypočte:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X}$$

nebo se součinitel κ určí z následujících dvou grafů:



Obr. 2.3.2 - součinitel κ nárazového zkratové proudu

- dvoufázový zkrat:

$$i_{p2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k2}$$

Norma dovoluje použít stejné hodnoty κ jako pro trojfázový zkrat, pokud $Z_{(1)} = Z_{(2)}$ je nárazový zkratový proud i_{p2} :

$$i_{p2} = \frac{\sqrt{3}}{2} i_p$$

- jednofázový zkrat:

$$i_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k1}$$

2.3.4 Ekvivalentní oteplovací zkratový proud I_{th}

U výpočtu ekvivalentního oteplovacího proudu se vychází z Jouleova integrálu $\int i^2 dt$, který určuje energii vytvářenou v odporovém prvku soustavy průchodem zkratového proudu.

Výpočet I_{th} provedeme dle [4] pomocí součinitele m pro časově závislý tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu a součinitele n pro časově závislý tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu (viz. obr. 2.3.4):

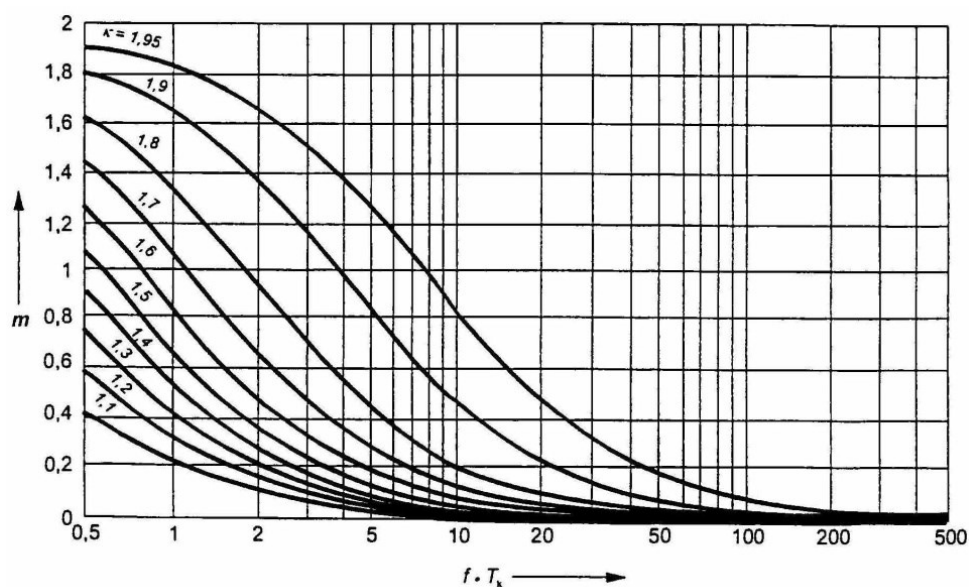
$$\int_0^{T_k} i^2 dt = I_k'^2 (m + n) T_k = I_{th}^2 T_k$$

$$I_{th} = I_k' \cdot \sqrt{m + n}$$

Pro distribuční síť (elektricky vzdálené zkraty) se může obvykle použít $n = 1$.

Pro elektricky vzdálené zkraty (distribuční síť) se jmenovitou dobou trvání zkratu 0,5s nebo větší, je dovolené uvažovat s $m + n = 1$.

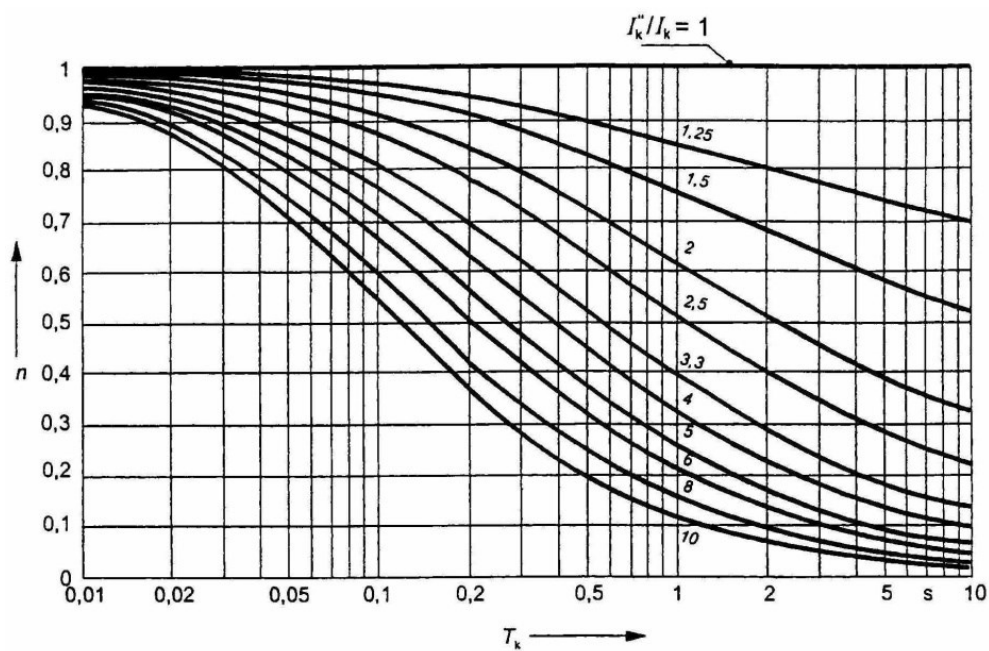
Součinitele m určíme z následujícího grafu:



Obr. 2.3.4a - součinitel m pro tepelný účinek stejnosměrné složky zkratového proudu

Součinitel m je získán z obr. použitím $f \cdot T_k$ a součinitelem κ určeného v kap. 2.3.3.

Součinitele n určíme z následujícího grafu:



Obr. 2.3.4b - součinitel n pro tepelný účinek střídavé složky zkratového proudu

3. Popis rozvodny R22 kV a napájení ÚK na lokalitě Dolu Darkov

3.1 Napájení rozvodny R22 kV na úpravárenském komplexu Dolu Darkov

Úpravárenský komplex (ÚK) je napájen z hlavní povrchové rozvodny 110/22/6 kV Závodu Důl Darkov soustavami o napětí 22 kV. Tato hlavní rozvodna se nachází mimo areál ÚK a je spravována firmou Veolia Energie ČR, a.s.. Rozvodna R22 kV spolu s rozváděčem R61 6 kV, se nacházejí na ÚK v objektu vodního prádla na podlaží +8,7 m.

Rozvodna R22 kV na ÚK v objektu vodního prádla, je napájena z hlavní povrchové rozvodny, části „22/6 kV Darkov 2 – ÚZ – Rozváděč R 22 kV“ z kobek č.11 nebo č.22. Propojení rozvoden je provedeno dvěma kabelovými přívody (2x 3x 22-AXEKCY 1x240), každý o délce 570 m, z nichž jeden slouží jako rezerva. Z rozvodny R22 kV jsou napájeny transformátory T7 nebo T8 (22/6 kV, 10 MVA) a z nich pak rozváděč R61, který slouží k napájení ostatních rozvoden v síti 6 kV na ÚK. Celkové přehledové schéma napájení rozvoden na ÚK je uvedeno jako příloha č.1 diplomové práce.

3.2 Popis rozvodny R22 kV

Rozvodna R22 kV se nachází v objektu vodního prádla na podlaží + 8,7 m. Je tvořena z výsuvných skříňových rozvaděčů typu RIO 644 s jednoduchým systémem přípojníc. Silový obvod rozváděče je plně izolován. Všechny jeho části jsou opatřeny kombinovanou izolací „pevná látka - vzduch“. Každá fáze hlavního obvodu je izolována samostatně. Jako izolačního a současně konstrukčního materiálu je použito epoxidové pryskyřice. Každé rozváděčové pole sestává z pevné a výsuvné části. Pevnou část tvoří nosná ocelová konstrukce - kostra. Dno konstrukce je opatřeno kolejkami pro pojezd výsuvné části a dvěma vodícími čepy, které zajišťují přesné navedení výsuvné části při zasouvání do kontaktů. V horní části zadního rámu jsou namontovány přístrojové transformátory typu TSR a TTR.

Rozvodna R22 kV je dimenzována na $I_n = 1250 \text{ A}$, $U_n = 25 \text{ kV}$, $i_p = 50 \text{ kA}$ a $I_{th(1s)} = 20 \text{ kA}$.

Rozváděč R61 je umístěn v rozvodně R22 kV a je tvořen z výsuvných skříňových rozvaděčů typu IRODEL VH 151.1 s jednoduchým systémem přípojníc. Rozvaděče jsou volně stojící, uspořádané ve dvou řadách po 33-ti ks zády k sobě s mezerou 100 mm. Každá řada tvoří samostatnou linku č.1 a linku č.2. Linka č.1 je napojena z transformátoru T7, linka č.2 z transformátoru T8, přičemž obě linky jsou propojené podélnou spojkou přípojníc. Při běžném chodu technologie ÚK je rozváděč R61 napájen pouze jedním z transformátorů, a přes sepnutou podélnou spojkou přípojníc jsou napájeny obě linky rozváděče R61. Při vzniku potřeby maximálního odběru (velmi zřídka), je spojka přípojníc v rozepnutém stavu a každá linka je napájena zvlášť svým transformátorem.

Rozváděč R61 je dimenzován na $i_p = 100 \text{ kA}$, $I_{th} = 40 \text{ kA}$, Přípojnice z Cu jsou dimenzovány do $I_n = 1250 \text{ A}$ a $U_n = 12 \text{ kV}$. Údaje jednotlivých vývodových polí jsou uvedeny na štítku jednotlivých skříní.

Všechny odbočky skříňové rozvodny R22 kV, vč. rozváděče R61 jsou ovládány pouze z místa. V zapojení jednotlivých odboček je však respektována možnost dálkového ovládání.

Pro umístění rozdílových ochran transformátorů T7 a T8 slouží samostatný skříňový rozváděč dvoustranný s čelní panelovou stěnou typu UNIBLOK U-2204 označen v rozvodně nápisem „RO“. PTP pro napojení rozdílových ochran transformátorů T7 a T8, jsou umístěné v kabelovém prostoru v blízkosti kobek č.10 a č.11 (R22 kV) a č.1 a č.57 (R61). Transformátory T7 a T8 jsou trojfázové olejové transformátory, typu aTO 492/35 o výkonu 10 MVA . Transformátory jsou umístěné v samostatných trafokobkách na podlaží +1,1m v objektu vodního prádla.

3.2.1 Způsob měření

Každé pole rozvodny R22 kV , resp. i rozváděče R61, je vybaveno přístrojovými transformátory proudu. Motorová vývodová pole rozváděče R61 jsou navíc ke klasickým PTP osazena pomocnými přesycenými transformátory proudu typu IKZ 05, které byly v minulosti dodávány spolu s elektromechanickými ochranami AB21. Přístrojovými transformátory napětí jsou vybaveny pouze pole měření, tzn. pole č.3 na R22 kV a pole č.2 a č.56 v rozváděči R61 6 kV . Technické údaje PTP a PTN se nacházejí v kap. 4 v popisu výzbroje jednotlivých rozvaděčových polí.

3.2.2 Výzbroj skříní

- **Odpojovače** – jejich funkce je nahrazena v celé šíři výsuvnými kontakty tím způsobem, že se výsuvná část s vypínačem, odpojovacím můstkem nebo pojistkovými patronami vysune do odpojené polohy. Samotný odpojovač ve skříní je proveden jako výsuvná část s výsuvnými kontakty, tzv. odpojovací můstek, na kterém mohou být umístěny PTP a PTN.
- **Vypínače:**
 - a) Máloolejové vypínače typu HG 4 s celkovou dobou vypnutí $t_{vyp} = 0,08 s$,
 - b) ABB VM1 - vakuový vypínač vn s magnetickým pohonem jako retrofit původních máloolejových vypínačů HG 4 s celkovou max. dobou vypnutí $t_{vyp} = 0,06 s$,
 - c) Vakuové stykače,
 - všechny tři typy vypínačů jsou umístěny na podvozku a opatřeny růžicovými výsuvnými kontakty v izolačních pouzdrech, kterými se připojují k silovému obvodu vn.
- **PTP** – přístrojové transformátory proudu EJP typu TSR a TTR.
- **PTN** – přístrojové transformátory napětí EJP typu TJP.
- **Elektromechanické ochrany:**
 - a) Tepelná nadproudová časová relé AB 21,
 - b) Nadproudové časově nezávislé ochrany typu AT 31 X1,
 - c) Tranzistorová rozdílová ochrana typu RAX 1,
 - d) Třífázová napěťová ochrana typu V 32 – 0.
- **Digitální ochrany** - kombinovaná nadproudová a zemní ochrana typu SPAJ 140 C.

3.3 Popis současného stavu chránění

3.3.1 Vypínače

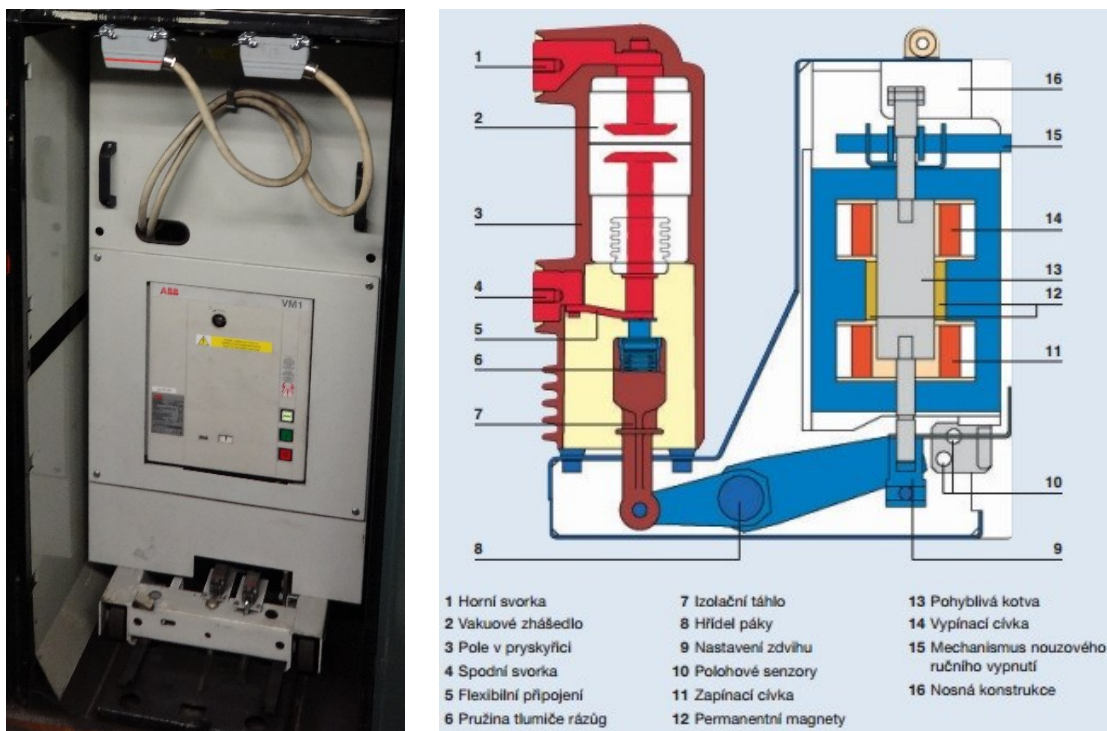
Máloolejový vypínač EJF HG 4-8F2

Máloolejové vypínače typu HG 4 jsou provedeny jako třípólové vypínače se samostatnými pólovými sloupy navzájem vázanými na společný střádačový pohon, který je montován jako celek samostatně na rámu vypínače. Pól je k rámu připevněn litinovou skříní, ve které je převodový mechanismus k pohonu spínacího roubíku. Provedení vypínačů je na pojízdném podvozku. Vypínače jsou vybaveny pružinovým střádačovým pohonem. Napínání pružin je buď ruční nebo elektromotorkem. Pól vypínače se skládá ze spodní skříně mechanismu, na který je uchycen izolační válec skládající se z horní a dolní části, které jsou uprostřed zešroubovány pomocí vnější objímky a dvou vnitřních objímek. Vnější objímka je zároveň držákem průchozí kontaktní růžice a má opracovanou plochu se závity pro přívod. Na horní izolační válec je objímkou uchycena expanzní komora. Její střední část tvoří expanzní prostor se vzduchovým polštářem nad hladinou olejové náplně. Skříň dolní části pólu je odlitek z litiny. Ve dně je ventil k vypouštění oleje. V nálitku skříně je uložen hřídel s pákou. Uvnitř skříně je páka spojena s táhlem, které je spojeno s izolační částí roubíku. Tím je zajištěn suvný pohyb roubíku od vnějšího střádačového pohonu, společného pro tři póly.

Elektrická funkce vypínání pólu vypínače je dosažena uvolněním vypínací pružiny střádačového pohonu, ta přenesou pohybovou energii na spínací roubík, který vyjede směrem dolů z horní kontaktní růžice. Mezi opalovacím nástavcem a opalovacími nástavky palců horní kontaktní růžice vznikne elektrický oblouk. Ten je postupně vtahován do zhášecí komory tak, jak se zvětšuje vzdálenost mezi opalovacím nástavcem a opalovacím kroužkem. Energie uvolněná hořením elektrického oblouku přemění část oleje v plynné složky a tlak ve zhášecí komoře narůstá. V okamžiku, kdy proud prochází 0, elektrický oblouk pohasne, plynné složky a olej usměrněný ve zhášecí komoře deionizují obloukovou dráhu a zabrání znovuzápálení elektrického oblouku. Deionizace musí nastat rychleji než nárůst zotaveného napětí. Tomu napomáhá konstrukce zhášecí komory pro příčné zhášení.

ABB VM1 - vakuový vypínač vn s magnetickým pohonem jako retrofit původních máloolejových vypínačů vn

Původní tlakovzdušná, máloolejová i SF₆ technika je postupně vytlačována spínací technikou vakuovou. Současné moderní provedení vn rozváděčů má lepší technické parametry, vyšší spolehlivost a bezpečnost provozu, snižuje náročnost obsluhy, prodlužuje provozní dobu do revize zařízení. Metoda retrofitu umožňuje provést modernizaci všech dříve vyráběných typů rozváděčů, a to prakticky za provozu, protože výměna výsuvných částí, včetně drobných úprav skříně, nevyžaduje nutně odstávku celého rozváděče. Náklady na modernizaci rozváděčů vn při realizaci projektu retrofit jsou výrazně nižší, než při výměně celého rozváděče. Dle zkušeností firmy ABB se jedná cca o 40 až 50% nákladů potřebných na nákup nového rozváděče (bez jeho montáže). Výrazná je také úspora času na realizaci modernizace.



Obr. 3.3.1 - vakuový vypínač ABB VM1 jako retrofit máloolejového vypínače a jeho konstrukce

Popis funkce:

Vypínače VM1 používají vakuová zhášedla uzavřená v pólech z pryskyřice. Zhášedlo, ve kterém jsou uloženy kontakty, nahrazuje zhášecí komoru. Pohon kontaktů zhášedel je prováděn jedním magnetickým pohonným zařízením, řízeným senzory polohy a elektronickým modulem.

Technika magnetického pohonu - magnetický pohon použitý ve vypínačích VM1 vytváří pohyb požadovaný pro aktivaci pohyblivých kontaktů zhášedel a integruje všechny funkce tradičního pohonu. Magnetický pohon je dvoustavový systém, kde jsou koncové polohy pohyblivé kotvy dosaženy pomocí magnetických polí, vytvářených ve dvou cívkách (jedna pro zapínání a druhá pro vypínání). Pohyblivá kotva je držena v poloze permanentními magnety.

Vakuový vypínač při zhášení proudu nepotřebuje vypínací a izolační médium. Vakuové zhášedlo vlastně neobsahuje ionizovatelný materiál. V každém případě je při oddělení kontaktů vytvářen elektrický oblouk, tvořený výlučně z roztaveného a odpařeného kontaktního materiálu. Elektrický oblouk je podporován externí energií, dokud není proud přerušen při průchodu přirozenou nulou. V tomto okamžiku vede rychlé snížení přenášené hustoty zatížení a rychlá kondenzace kovových par k velmi rychlému obnovení dielektrických vlastností. Vakuové zhášedlo proto obnoví izolační schopnost a schopnost snášet přechodné zotavené napětí a definitivně zháší oblouk.

3.3.2 Ochrany

AT 31 X1 - Nadproudové časově nezávislé ochrany

Jsou to nadproudové, sekundární, časově nezávislé ochrany elektrických zařízení při přetíženích a zkratech. Ochrany můžou být provedeny jako jednofázové (AT 12 X1 – jeden měřicí článek), dvoufázové (AT 21 X1 – dva měřicí články) nebo třífázové (AT 31 X1 – tři měřicí články) relé. Přesný časový článek zaručuje spolehlivé působení při selektivní ochraně.

Ochrana je sestavena ze tří nadproudových měřících článků, časového článku a koncového relé. Nadproudové měřicí články jsou přesná elektromagnetická relé s otočnou kotvou. Cívka je dvouvinutová. Rozsah seřízení náběhového proudu se nastavuje ve dvou rozsazích spojovacími můstky na svorkovnici a plynule knoflíkem nad stupnicí. Časový článek pracuje na elektronickém principu s rozsahy, uvedenými v technických údajích. Vedle časově zpožděného kontaktu „t“ obsahuje ještě kontakt okamžitý „t₀“ se zpožděním cca 7 ms od připojení časového článku na napětí. Čas ochrany jako celku je delší o čas měřicího článku (cca 10 až 20 ms) a o čas koncového relé (cca 13 ms). Celkový čas ochrany je delší o cca 20 až 35 ms. Koncové relé je normální pomocné ss relé. Kromě přepínacího a zapínacího kontaktu má padáčkový kontakt, který je po přitažení relé aretován v sepnutém stavu, pokud se signální padáček tohoto relé nevrátí do klidového stavu.

AB 21 – Tepelná nadproudová časová relé

Používají se jako proudově závislé ochrany motorů, transformátorů a jiných spotřebičů při přetíženích nebo zkratech. Relé vypínají při malých nadproudech závisle zpožděně (dle charakteristiky), při velkých nadproudech okamžitě. Typ AB 21 je provedení dvoufázové, typ AB 31 je provedení trojfázové. Ke chránění malých a středně velkých spotřebičů stačí použít relé AB 21. U zařízení vn je toto relé postačující jen tehdy, není-li nulový vodič uzemněn a jestliže všechny poruchy mezi fázemi mohou být bezvadně zachyceny dvoupólovým relé (při zkratech mezi vodičem a zemí nevznikají při izolovaném nulovém bodu žádné nadproudy).

Relé AB 21 jsou složena ze dvou nadproudových článků. Každý článek se skládá z členu tepelného, elektromagnetického a z nařizovacího odporu k tepelnému členu. Tepelný člen je tvořen bimetalovým páskem, vyhřívaným topnou cívkou z odporového materiálu. Pásek je upevněn v otočném držáku ještě s druhým – kompenzačním. Tím je dosaženo správné funkce tepelného členu nezávisle na okolí v nejširších mezích. Elektromagnetický člen tvoří malé relé na střídavý proud se sklopnou kotvou. Kotva ovládá zapínací nebo rozpínací kontakt. Změnou její vzdálenosti od jádra (nastavením) se mění i potřebný náběhový proud.

V ustáleném stavu protéká vinutím elektromagnetického i tepelného členu proud o hodnotě rovné nebo menší než je hodnota, nařízená na stupnici. Bimetalové pásky se tímto proudem sice částečně ohřejí, ale pak je již systém v tepelné rovnováze. Zvýší-li se proud nad nařízenou hodnotu (nejméně na 1,15 násobek), začne se horní bimetalový pásek prohýbat, až po určité době sklouzne ostří jeho narážky přes břit kontaktní páky. Po otočení kontaktní pákou tak, že se kontakty spojí (resp. rozpojí). Tím je dán impuls pro vypnutí. Spojení (resp. rozpojení) kontaktů je mžikové. Stoupne-li proud náhle na několikanásobek jmenovité hodnoty (např. při zkratu), nabudí se cívka elektromagnetického členu, přitáhne kotvu a přeloží kontakt. Všechny tepelné i elektromagnetické členy pracují na sobě nezávisle, takže impuls kteréhokoliv členu odpojí chráněný stroj od sítě.

ZPA Trutnov RAX 1 - Tranzistorová rozdílová ochrana

Rax 1 je tranzistorová rozdílová ochrana v kompletu s ochranou nadproudovou. Používá se jako ochrana transformátorů, strojů, tlumivek apod. Vestavěná nadproudová ochrana působí nezávisle na ochraně rozdílové při přetížení nebo zkratech. V každém případě PTP pro rozdílovou ochranu nesmí být zatěžovány ochranami jinými.

Nadproudová nezávislá časová ochrana je vhodná při přetížení nebo zkratu. Stoupne-li proud v některé fázi, stoupá napětí na bočníku v jednotce W 501. Po usměrnění se toto napětí objeví na vstupním děliči jednotky AT 001. Dosáhne-li nastavené úrovně, spíná komparátor jazýčkové relé. Současně se rozbíhá časový člen a po odběhnutí nastaveného zpoždění spíná koncové relé G.

Rozdílová ochrana působí při mezifázových zkratech uvnitř stroje nebo na té části přívodů k němu, jež leží mezi přístrojovými transformátory proudu ochrany. U transformátorů působí při všech vnitřních zkratech, tj. mezifázových ve vinutí, závitových zkratech, přeskočích na průchodkách a části přívodu, pokud leží mezi PTP. PTP je třeba vzhledem k rychlému působení ochrany dimenzovat tak, aby se nepřesytily ss složkou zkratového proudu. Při průchozím zkratu by při takovém přesycení mohla ochrana chybně působit. Princip funkce viz. kap. 1.5.1 Rozdílová ochrana.

ABB SPAJ 140 C – Kombinovaná nadproudová a zemní ochrana

Kombinovaná nadproudová a zemní ochrana SPAJ 140 C je určena pro selektivní chránění při zkratech a při zemních poruchách radiálních vývodů v účinně uzemněných, odporově uzemněných nebo impedančně uzemněných energetických systémech. Integrovaný soubor ochrany obsahuje jednotku fázové nadproudové ochrany a jednotku zemní ochrany s přizpůsobivým vybavením pro vypínání a signalizaci. Nadproudovou ochranu a zemní ochranu je také možné použít v aplikacích, kde je požadována jednofázová, dvoufázová nebo třífázová nadproudová ochrana a nesměrová zemní ochrana. Kombinovaná nadproudová a zemní ochrana také obsahuje / zajišťuje ochranu při selhání vypínače.



Obr. 3.3.2 - ochrana ABB SPAJ 140 C

Popis funkce:

SPAJ 140 C je sekundární relé, které je připojeno k proudovým transformátorům chráněného objektu. Třífázová nadproudová ochrana a zemní ochrana trvale měří fázové proudy a nulový proud chráněného objektu. Při detekci poruchy je po aktivaci ochrany (po popudu funkce) vypínán vypínač, jsou aktivovány funkce opětného zapnutí, výstražného hlášení, záznamu dat poruchy atd. v souladu s aplikační konfigurací ochranných funkcí.

Jestliže fázový proud překročí nastavenou hodnotu popudového proudu stupně s nižším rozsahem seřiditelnosti $I >$, je nadproudovou jednotkou po přednastaveném čase ~ 60 ms aktivován popudový signál. Po uplynutí nastaveného časového zpoždění (vypínací čas definovaný nezávislým časovým zpožděním nebo závislým časovým zpožděním funkce) je nadproudovou jednotkou aktivováno vypnutí. Obdobným způsobem je při překročení hodnoty popudového proudu nadproudového stupně s vyšším rozsahem seřiditelnosti $I \gg$ aktivován popudový signál tohoto stupně po přednastaveném čase ~ 40 ms. Po uplynutí nastaveného časového zpoždění nadproudová jednotka vypíná.

Jestliže proud zemní poruchy překročí nastavenou hodnotu popudového proudu stupně s nižším rozsahem seřiditelnosti $I_0 >$, je jednotkou zemní poruchy po přednastaveném čase ~ 60 ms aktivován popudový signál. Po uplynutí nastaveného časového zpoždění (vypínací čas definovaný nezávislým časovým zpožděním nebo závislým časovým zpožděním funkce) je jednotkou zemní poruchy aktivováno vypnutí. Obdobným způsobem je při překročení hodnoty popudového proudu stupně zemní ochrany s vyšším rozsahem seřiditelnosti $I_0 \gg$ aktivován popudový signál po přednastaveném čase ~ 40 ms. Po uplynutí nastaveného časového zpoždění jednotka zemní poruchy vypíná. U nadproudového stupně s nižším rozsahem seřiditelnosti $I >$ i u stupně zemní poruchy s nižším rozsahem seřiditelnosti $I_0 >$ je možné navolit charakteristiku s nezávislým časovým zpožděním, nebo charakteristiku se závislým časovým zpožděním (IDMT). Jestliže je zvolena charakteristika IDMT, je k dispozici šest typů křivek se závislostí čas / proud.

4. Technická data pro výpočty

4.1 Hlavní povrchová rozvodna 110/22/6 kV, část „ R22/6 kV Darkov 2 – ÚZ “

- **Rozvodná soustava:**

3+PE ~ 22 kV, 50Hz, – síť IT, kompenzovaná síť s uzlem uzemněným přes zhášecí tlumivku.

- **Dvě varianty napájení rozvodny R22/6 kV Darkov 2 – ÚZ z nadřazené sítě 110kV:**

- 1) pole č.26 - přívod z transformátoru T101 - 110/22kV
- 2) pole č.1 - přívod z transformátoru T102 - 110/22kV

- **Zkratové poměry rozvodny:**

Hodnoty zkratových proudů uvedené v tabulkách jsou počítány jako maximální hodnoty pro trojfázový počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{k3} a minimální hodnoty pro dvoufázový počáteční souměrný rázový zkratový proud I''_{k2} v síti IT. Hodnoty zkratových výkonů S''_{k3} jsou vypočítané ze zkratových proudů I''_{k3} .

- 1) při napájení z transformátoru T101

S''_{k3max} [MVA]	I''_{k3max} [kA]	I''_{k3min} [kA]	I''_{k2min} [kA]
426,39	11,19	6,246	5,41

- 2) při napájení z transformátoru T102

S''_{k3max} [MVA]	I''_{k3max} [kA]	I''_{k3min} [kA]	I''_{k2min} [kA]
382,57	10,04	6,097	5,28

- **Výzbroj a nastavení ochran těchto transformátorů – strana 22 kV**

(výzbroj a nastavení ochran pro T101 i T102 na straně 22 kV je totožné)

skříň č.1 , č.26

Transformátory T101 a T102 – strana 22 kV

2x odpojovač

Q1, Q2

1x výk. vypínač

QM1

2500 A

PTP:

TTR 63.k

1250/5/5 A

Ochrana REF543

I >

nastaveno 1000 A / k = 0,8 Long Time Inversion

I >>

signalizuje 1000 A / 12 s

I >>>

nastaveno 2875 A / 2,1 s

- **Dvě varianty napájení rozvodny R22kV v budově prádla:**

- 1) pole č.11 – ozn. prádlo přívod č.1
- 2) pole č.22 – ozn. prádlo přívod č.2

- **Výzbroj a nastavení ochran těchto rozvaděčových skříní:**

skříň č.11	přívod č.1 pro prádlo R22kV	
2x odpojovač	Q1, Q2	
1x výk. vypínač	QM1	1250 A
PTP:	TA1	750/5/5 A
Ochrana REF543	I >	nastaveno 750 A / k = 0,6 Long Time Inversion
	I >>	nastaveno 2250 A / 1,6 s
kabelové vedení	Kablo Kladno 2x 3x 22-AXEKCY 1x240 mm ² , l=570m	

skříň č.22	přívod č.2 pro prádlo R22kV	
2x odpojovač	Q1, Q2	
1x výk. vypínač	QM1	1250 A
PTP:	TA1	750/5/5 A
Ochrana REF630	I >	nastaveno 750 A / k = 0,6 Long Time Inversion
	I >>	nastaveno 2250 A / 1,6 s
kabelové vedení	Kablo Kladno 2x 3x 22-AXEKCY 1x240 mm ² , l=570m	

4.2 Rozvodna R22 kV v objektu budovy prádla

- **Rozvodná soustava:**

3+PE ~ 22 kV, 50Hz, – síť IT

- **Zkratové poměry rozvodny (původní):**

S''_{k3} [MVA]	I_{th} [kA]	I''_{k3} [kA]	i_p [kA]
606,280	15,846	15,237	34,374

- **Výzbroj a nastavení ochran některých rozvaděčových skříní:**

skříň č.1	přívod č.2 z R22/6 kV Darkov 2 – ÚZ, kobka č.22	
1x vypínač	ABB VM1 24.12-25	$I_n = 1250$ A
PTP:	EJF TTR 63.12	750/5/5 A; 15 / 30 VA;
		tř. 0,5-5P; n: -5-5;
PTN:	3x EJF TJP 6	22/0,1kV; 100 VA
Ochrana SPAJ 140 C	I >	525 A, 1,6s dlouhodobě inverzní;
	I >>	2250 A, 1,4 s
	zemní f-ce $I_0 > / I_0 >>$	nenastaveno

skříň č.2	přívod č.1 z R22/6 kV Darkov 2 – ÚZ, kobka č.11	
1x vypínač	ABB VM1 24.12-25	$I_n = 1250 \text{ A}$
PTP:	EJF TTR 63.12	750/5/5 A; 15 / 30 VA; tř. 0,5-5P; n: -5-5;
PTN:	3x EJF TJP 6	22/0,1kV; 100 VA
Ochrana SPAJ 140 C	$I >$	525 A, 1,6s dlouhodobě inverzní;
	$I >>$	2250 A, 1,4 s;
	zemní f-ce $I_0 > / I_0 >>$	nenastaveno
skříň č.3	pole měření	
PTN:	3x EJF TJP 6;	22/0,1 kV; 100 VA
Ochrana V 32 – 0	podpěťová ochrana	nastaveno 15 400 V
skříň č.10	vývod pro T7 10MVA 22/6kV	
1x vypínač	ABB VM1 24.12-25	$I_n = 1250 \text{ A}$
PTP:	EJF TTR 61.12	300/5/5 A; 10/15 VA; tř. 3-10P; n: <5-5;
Ochrana SPAJ 140 C	$I >$	264 A, 12s dlouhodobě inverzní
	$I >>$	1572 A, 1,2s
	zemní f-ce $I_0 > / I_0 >>$	nenastaveno
kabelové vedení k T7	Kablo Kladno 3x 22-AXEKCY 1x240 mm ² , l=40m	
skříň č.11	vývod pro T8 10MVA 22/6kV	
1x vypínač	ABB VM1 24.12-25	$I_n = 1250 \text{ A}$
PTP:	EJF TTR 61.12	300/5/5 A; 10/15 VA; tř. 3-10P; n: <5-5;
Ochrana SPAJ 140 C	$I >$	264 A, 12s dlouhodobě inverzní
	$I >>$	1572 A, 1,2s
	zemní f-ce $I_0 > / I_0 >>$	nenastaveno
kabelové vedení k T8	Kablo Kladno 3x 22-AXEKCY 1x240 mm ² , l=45m	
skříň „RO“ „ T7 “	rozdílové ochrany pro transformátory T7 a T8	
PTP (primární):	EJF TTR 61.11	500/5 A; 30 VA; tř. 5P; n = 8
PTP (sekundární):	EJF TTR 43.11	1000/5 A; 30 VA; tř. 5P; n = 12
Ochrana RAX 1	rozdílová ochrana	$I_n=5\text{A}$; nast.:0,6 $I_n=3\text{A}$, t=0,04 s
„ T8 “		
PTP (primární):	EJF TTR 61.11	500/5 A; 30 VA; tř. 5P; n = 8
PTP (sekundární):	EJF TTR 43.11	1000/5 A; 30 VA; tř. 5P; n = 12
Ochrana RAX 1	rozdílová ochrana	$I_n=5\text{A}$; nast.:0,6 $I_n=3\text{A}$, t=0,04 s

4.3 Rozváděč R61 na rozvodně R22 kV

- **Rozvodná soustava:**

3+PE ~ 6 000 V, 50Hz, – síť IT

- **Zkratové poměry rozvodny (původní):**

S''_{k3} [MVA]	I_{th} [kA]	I''_{k3} [kA]	i_p [kA]
123,681	11,688	11,348	27,201

- **Výzbroj a nastavení ochran některých rozvaděčových skříní:**

skříň č.1

přívod z T7 10MVA 22/6kV

výk. vypínač	VM1 1.12 (vakuový)	1250 A
PTP:	TTR 43.11	1000/5/5 A; 30/30 VA; tř. 0,5/5P; n = 5/5;
Ochrana SPAJ 140 C	$I > / I >>$	900 A / 200% 1,11s;
kabelové vedení	Kablo Kladno 6-AYKCY 3x3x240 mm ² , l = 22 m	

skříň č.2

pole měření

PTN:	3x EJF TJP 4;	6/0,1 kV;
Ochrana V 32 – 0	podpětťová ochrana	nastaveno 3 600 V

skříň č.15, 19, 21

kabelové vývody motorů 250kW vývěv 1289.1, 5, 7 I.linky

výk. vypínač	EJF HG 4 (máloolejový)	1250 A
PTP:	TSR 61.11	30/5 A; 30 VA; tř. 10P; n = 5
Ochrana AB21	$I > / I >>$	30,3 A / 300 A
kabelové vedení	Kablo Kladno 6-AYKCY 3x120 mm ² , l = 115-135 m	

skříň č.16

kabelový vývod motoru 250kW nové vývěvy 1289.2 I.linky

výk. vypínač	EJF HG 4 (máloolejový)	1250 A
PTP:	TSR 61.11	30/5 A; 30 VA; tř. 10P; n = 5
Ochrana AB21	$I > / I >>$	30,3 A / 300 A
RC člen	přepětťová ochrana	R = 3 x 30 MΩ, C = 3 x 0,5 μF
kabelové vedení	Kablo Kladno 6-AYKCY 3x120 mm ² , l = 115 m	

skříň č.17

kabelový vývod motoru 200kW vývěvy 1289.3 I.linky

výk. vypínač	EJF HG 4 (máloolejový)	1250 A
PTP:	TSR 61.11	30/5 A; 30 VA; tř. 10P; n = 5
Ochrana AB21	$I > / I >>$	30,3 A / 300 A
kabelové vedení	Kablo Kladno 6-AYKCY 3x120 mm ² , l = 125 m	

skříň č. 36, 37, 38, 42 kabelové vývody motorů 200 kW vývěv 2289.8, 7, 6, 2 II.linky

výk. vypínač	VM1 1.12 (vakuový)	1250 A
PTP:	TSR 61.11	30/5 A; 30 VA; tř. 10P; n = 5
Ochrana AB21	I > / I >>	24,5 A / 240 A
kabelové vedení	Kablo Kladno 6-AYKCY 3x240 mm ² , l = 105-145 m	

skříň č.39 kabelové vývody motoru 250 kW vývěvy 2289.5 II.linky

výk. vypínač	VM1 1.12 (vakuový)	1250 A
PTP:	TSR 61.11	30/5 A; 30 VA; tř. 10P; n = 5
Ochrana AB21	I > / I >>	29,1 A / 240 A
kabelové vedení	Kablo Kladno 6-AYKCY 3x240 mm ² , l = 145 m	

Kobka č.40 kabelový vývod motoru nové vývěvy 2289.4 II.linky

výk. vypínač	VM1 1.12 (vakuový)	1250 A
PTP:	TSR 61.11	30/5 A; 30 VA; tř. 10P; n = 5
Ochrana AB21	I > / I >>	24,5 A / 240 A
RC člen	přepět'ová ochrana	R = 3 x 30 MΩ, C = 3 x 0,5 μF
kabelové vedení	Kablo Kladno 6-AYKCY 3x240 mm ² , l = 135 m	

skříň č.56**pole měření**

PTN:	3x EJP TJP 4;	6/0,1 kV;
Ochrana V 32 – 0	podpět'ová ochrana	nastaveno 3 600 V

skříň č.57**přívod z T7 10MVA 22/6kV**

výk. vypínač	VM1 1.12 (vakuový)	1250 A
PTP:	TTR 43.11	1000/5/5 A; 30/30 VA; tř. 0,5/5P; n = 5/5;
Ochrana SPAJ 140 C	I > / I >>	900 A / 200% 1,11s;
kabelové vedení	Kablo Kladno 6-AYKCY 3x3x240 mm ² , l = 27 m	

4.4 Štítkové a katalogové údaje

4.4.1 Parametry dvouvinuťových transformátorů

Ozn.	typ	U_{rTHV} [V]	U_{rTLV} [V]	I_{rTHV} [A]	I_{rTLV} [A]	P_{krT} [W]	u_{kr} [%]	S_{rT} [VA]
T1	aTO 414/22	22000	525	42	1760	14400	6,06	1600000
T2	aTO 414/22	22000	525	42	1760	14400	5,88	1600000
T3	aTO 414/22	22000	525	42	1760	14400	6,06	1600000
T4	aTO 414/22	22000	525	42	1760	14400	5,91	1600000
T5	aTO 414/22	22000	525	42	1760	14400	6,08	1600000
T6	aTO 414/22	22000	525	42	1760	14400	6,06	1600000
T7	aTO 492/35	22000	6300	262	916	60000	7,02	10000000
T8	aTO 492/35	22000	6300	262	916	60000	7,12	10000000
T11	aTO B414/22	22000	525	42	1760	14400	6,39	1600000
T12	aTO B414/22	22000	525	42	1760	14400	6,29	1600000
T1-1	aTS 812/6A	6000	525	154	1760	14400	5,97	1600000
T1-2	aTS 812/6A	6000	525	154	1760	14400	5,91	1600000
T1-3	aTS 812/6A	6000	525	154	1760	14400	6,02	1600000
T1-4	aTS 812/6A	6000	525	154	1760	14400	6,05	1600000
T1-220	aTS 792/6A	6000	525	96,3	1110	8750	6	1000000
T1-108	aTS 812/6A	6000	525	154	1760	14400	5,86	1600000
T1-158	aTS 812/6A	6000	525	154	1760	14400	5,94	1600000
T1-508	aTS 792/6A	6000	525	96,3	1110	8750	5,97	1000000

Tab. 4.4.1 - parametry dvouvinuťových transformátorů

4.4.2 Parametry kabelů

typ	U_n [V]	R_{L20} [Ω/km]	L_k [H/km]	X_k [Ω/km]	θ_e [°C]	\underline{Z}_k [Ω/km]
22-AXEKCY 1 x 240	22000	0,125	0,000362	0,1137257	90	$0,125 + j 0,1137257$
6-AYKCY 3 x 240	6000	0,129	0,000229	0,0719425	70	$0,129 + j 0,0719425$
6-AYKCY 3 x 1 x 500	6000	0,061	0,00026	0,0816814	90	$0,061 + j 0,0816814$
1-AYY 3 x 1 x 500	500	0,06	0,00043	0,1350885	70	$0,06 + j 0,1350885$

Tab. 4.4.2 - parametry kabelů

4.4.3 Parametry motorů vn

typ	P_{rM} [W]	I_{LR} / I_{rM} [-]	U_{rM} [V]	$\eta_{rM} \cdot \cos\phi_{rM}$ [-]	I_{rM} [A]
ZSE MEZ D1N4 355 L-4	200000	5,5	6000	0,78456	24,5
ZSE MEZ D1N4 355 X-4	250000	5,8	6000	0,79815	30,1
ZSE MEZ D1N4 355 Y-4	315000	6	6000	0,81012	37,4
ZSE MEZ D1N4 355 Z-4	400000	6	6000	0,8265	46,5
ZSE MEZ D1K4 355 L-4	200000	5,5	6000	0,782	24,6
ZSE MEZ D1N4 355 Y-2	315000	6,5	6000	0,83248	36,4
SIEMENS 1AN4 355 V-4	310000	5	6000	0,8024	37,2

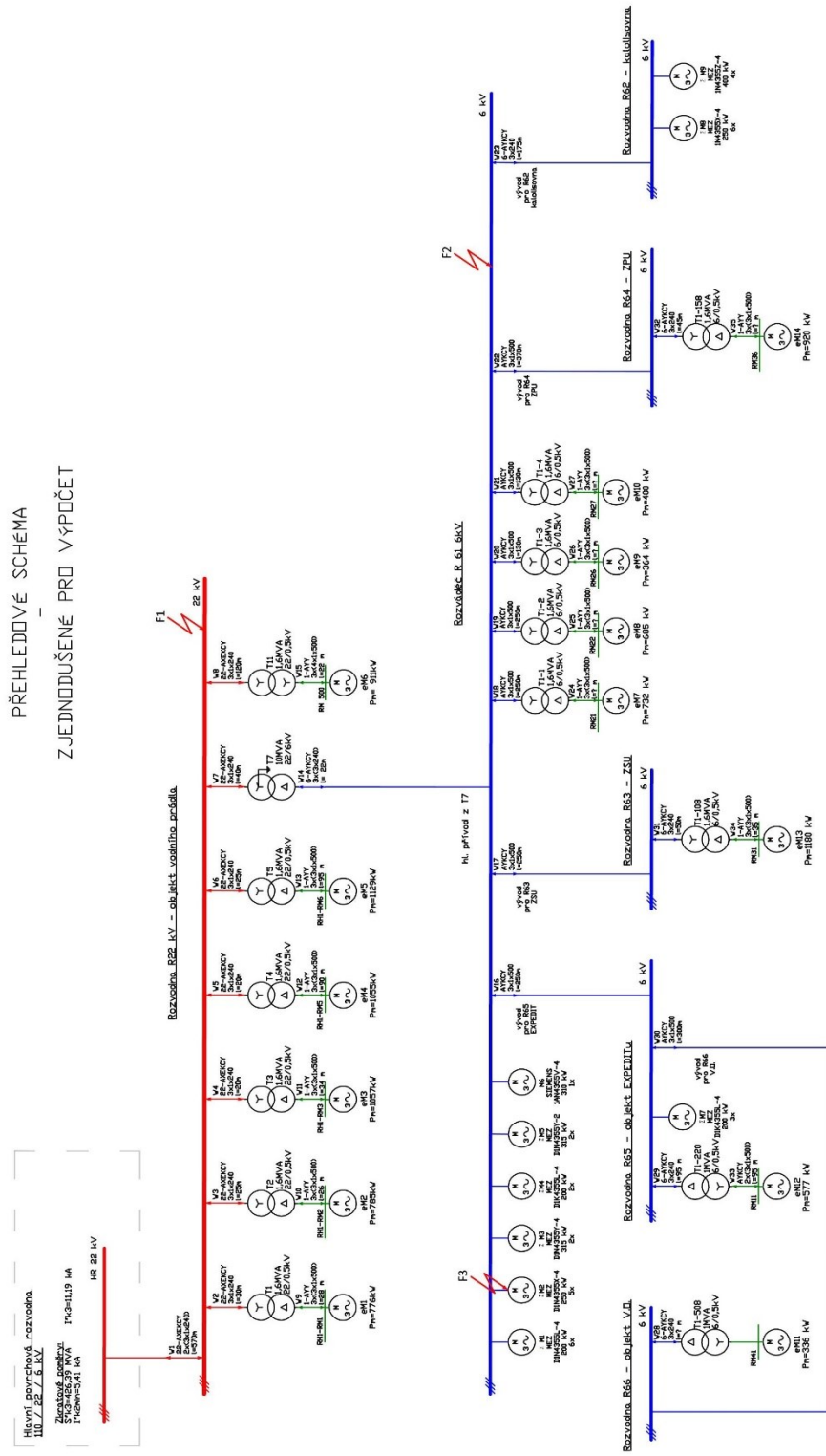
Tab. 4.4.3 - parametry motorů vn

4.4.4 Parametry skupin ekvivalentních motorů nn 500V

označení	P_{rM} [W]	I_{LR} / I_{rM} [-]	U_{rM} [V]	$\eta_{rM} \cdot \cos\phi_{rM}$ [-]	I_{rM} [A]
eM1	776000	5	500	0,85	-
eM2	785000				
eM3	1057000				
eM4	1055000				
eM5	1129000				
eM6	911000				
eM7	732000				
eM8	685000				
eM9	364000				
eM10	400000				
eM11	336000				
eM12	577000				
eM13	1180000				
eM14	920000				

Tab. 4.4.4 - parametry skupin ekvivalentních motorů nn 500V

5. Výpočet zkratových poměrů na rozvodně R22 kV



Obr. 5 - zjednodušené přehledové schéma napájení rozvoden na ÚK

Stanovení zkratových poměrů na rozvodně je důležité z důvodu nastavení ochran a dimenzování el. zařízení, které je zkratovým proudem namáháno. Abychom mohli zajistit správné nastavení nadproudových zkratových ochran, které musí chráněné zařízení odpojit už při nejmenším zkratovém proudu, musíme znát minimální dvoufázový zkratový proud I''_{k2min} . Pro kontrolu zařízení na oteplení – tedy výpočtu maximálního času, do kdy je nutné zařízení odepnout, aby nedošlo k jeho poškození, potřebujeme znát ekvivalentní oteplovací proud I_{th} . Ten se určí z maximálního rázového třífázového zkratového proudu I''_{k3max} .

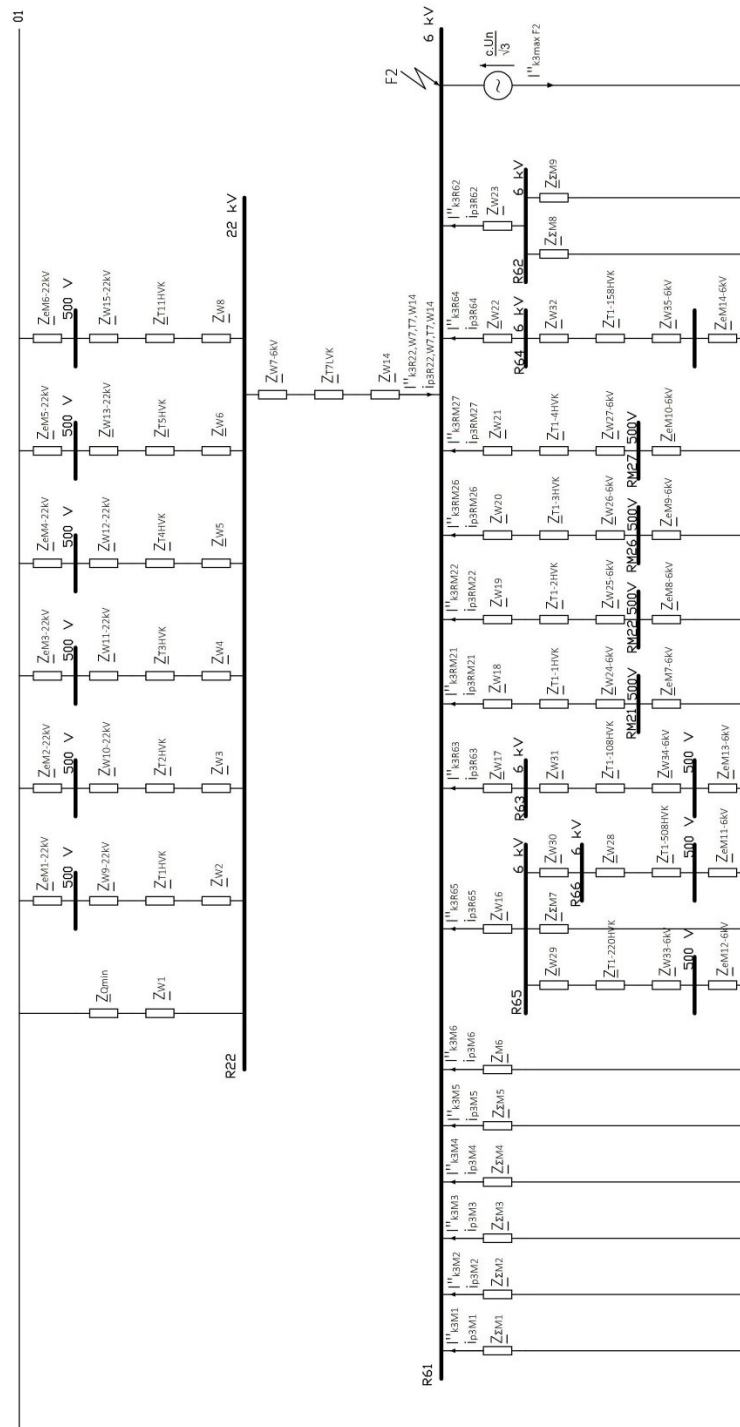
Pro výpočet zkratových poměrů na rozvodně R22 kV jsem sestavil zjednodušené přehledové schéma napájení rozvodu na ÚK znázorněné na obr. 5 (uvedeno i jako příloha č.2), které představuje běžné provozní zapojení, kdy provoz ÚK je provozován s veškerou možnou technologií. Zjednodušené přehledové schéma vychází z celkového přehledového schématu z přílohy č.1 diplomové práce. Veškerá nepotřebná el. zař., která nepřispívají k celkovému zkratovému proudu a nejsou pro výpočet důležitá, byla zanedbána. Dále jsem pro zjednodušení výpočtu zanedbal impedance spojovacích kabelů mezi přípojnícemi a motory vn (výsledky budou na straně bezpečnosti). Ve schématu na obr. 5 jsou znázorněny místa třífázového zkratu F1 na sběrnách R22 kV , F2 na sběrnách R61 $6 kV$ a místo F3, které znázorňuje 3-f zkrat na svorkách jednoho z asynchronních motorů s ozn. M2 napájeného ze sběrnice R61. Motory vn $6 kV$ stejných parametrů jsou pro zjednodušení výpočtu znázorněny a počítány jako skupiny motorů s označením $\Sigma M1 - \Sigma M9$. Motory nn $500 V$ vč. přírodních kabelů k motorům jsou nahrazeny ekvivalentními motory skupin motorů s označením eM1 – eM14, jak dovoluje ČSN EN 60909-0, viz. kap. 2.2.7 diplomové práce.

Pro výpočet maximálních zkratových proudů v místech zkratů F1, F2 a F3 jsem sestavil výchozí náhradní schémata zkratových impedancí viz. obr. 5.1.1, 5.1.2 a 5.3.5. Celkové zkratové proudy jsou tedy tvořeny: příspěvkem max. zkratového výkonu z nadřazené soustavy HR 22 kV , příspěvky zkratových proudů asynchronních motorů vn $6 kV$ a příspěvky zkratových proudů z podružných rozvodů vč. asynchronních motorů nn $500 V$.

U výpočtu minimálních zkratových proudů v místech zkratů F1, F2 a F3 jsem vycházel z konfigurace rozvodu, kde k celkovým zkratovým proudům přispívá pouze min. zkratový výkon z nadřazené soustavy HR 22 kV . Příspěvky od asynchronních motorů jsou zanedbány. Náhradní schémata viz. obr. 5.3.2a-b, 5.3.4a-b.

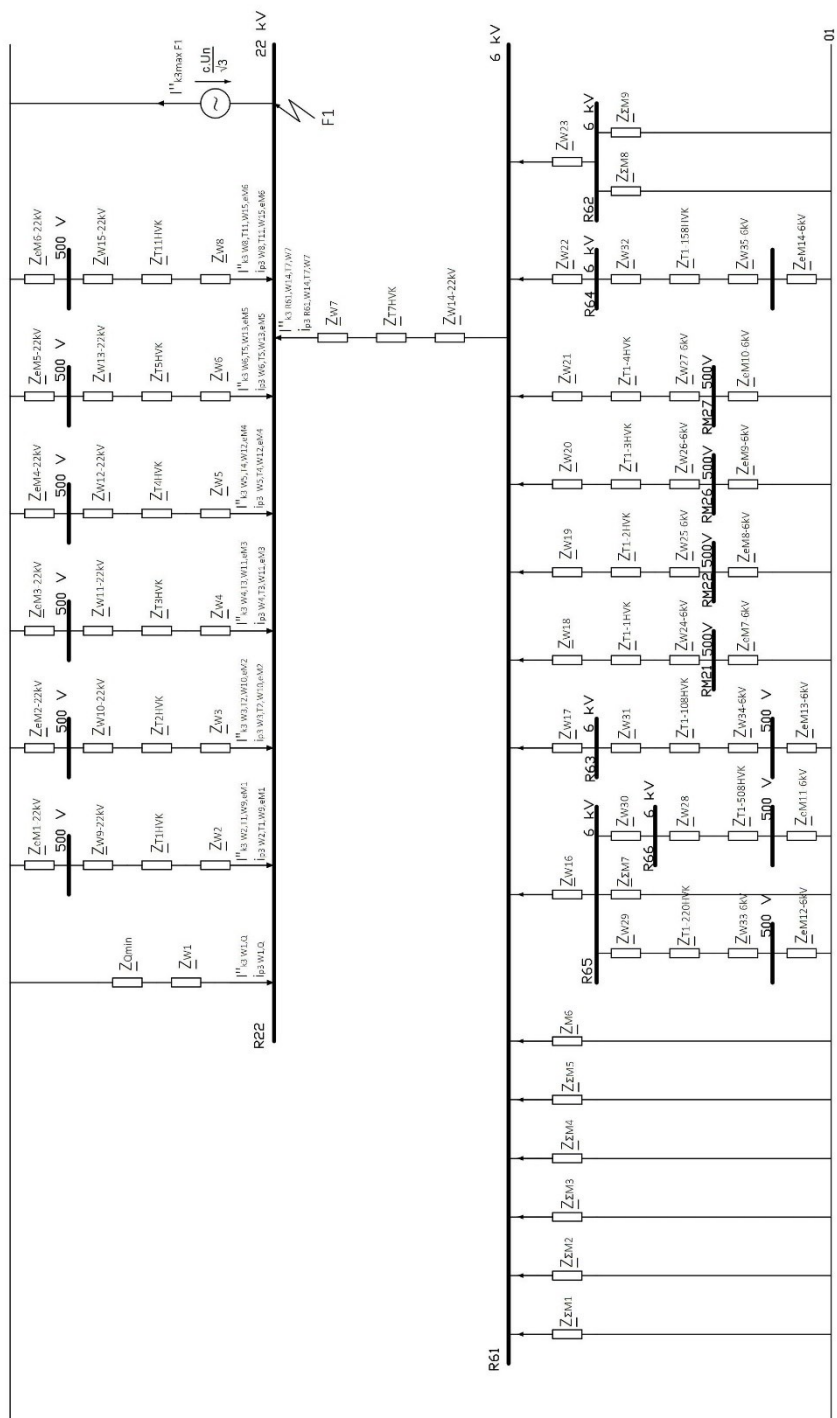
V postupu výpočtu jsou respektovány předpoklady a postupy uvedené v kap.2.1 a kap.2.2 diplomové práce. U celého průběhu výpočtu jsem se snažil řídit a dbát doporučení platné normy ČSN EN 60909-0. Vzhledem k obsáhlosti výpočtu zkratových poměrů řešené soustavy, byl využit pro veškerý výpočet program EXCEL a v následujících kapitolách budou uvedeny pouze příklady výpočtu zkratových impedancí a zkratových proudů. Důležité výsledky však budu vypsány vždy v závěru jednotlivých kapitol v přehledových tabulkách.

5.1.1 Náhradní schéma č.1 pro výpočet max. 3-f zkratu v místě F2



Obr. 5.1.1 - výchozí náhradní schéma č.1 pro výpočet max. 3-f zkratu v místě F2

5.1.2 Náhradní schéma č.1 pro výpočet max. 3-f zkratu v místě F1



Obr. 5.1.2 - výchozí náhradní schéma č.1 pro výpočet max. 3-f zkratu v místě F1

5.2 Výpočet zkratových impedancí jednotlivých prvků soustavy

Vstupní data pro určení hodnot zkratových impedancí jednotlivých prvků jsou brána z kap. 4.4, tab. 4.4.1 – 4.4.4.

5.2.1 Síťový napáječ „ Q “ (nadřazená soustava - rozvodna HR22 kV)

- vstupní data:

$$c_{max} = 1,1$$

$$U_{nQ} = 22000 \text{ V}$$

$$I_{k3Qmax} = 11190 \text{ A}$$

$$c_{min} = 1$$

$$I_{k3Qmin} = 6246 \text{ A}$$

- nejnižší možná impedance pro stanovení maximálního 3-f zkratového proudu:

$$Z_{Qmin} = \frac{c_{max} U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{k3Qmax}} = \frac{1,1 \cdot 22000}{\sqrt{3} \cdot 11190} = 1,249 \Omega$$

$$X_{Qmin} = 0,995 \cdot Z_{Qmin} = 0,995 \cdot 1,25 = 1,242 \Omega$$

$$R_{Qmin} = 0,1 \cdot X_{Qmin} = 0,1 \cdot 1,242 = 0,124 \Omega$$

$$Z_{Qmin} = (R_{Qmin} + jX_{Qmin}) = (0,124 + j1,242) \Omega$$

- největší možná impedance pro stanovení minimálního 3-f a 2-f zkratového proudu:

$$Z_{Qmax} = \frac{c_{min} U_{nQ}}{\sqrt{3} \cdot I_{k3Qmin}} = \frac{1 \cdot 22000}{\sqrt{3} \cdot 6246} = 2,034 \Omega$$

$$X_{Qmax} = 0,995 \cdot Z_{Qmax} = 0,995 \cdot 2,034 = 2,023 \Omega$$

$$R_{Qmax} = 0,1 \cdot X_{Qmax} = 0,1 \cdot 2,023 = 0,202 \Omega$$

$$Z_{Qmax} = (R_{Qmax} + jX_{Qmax}) = (0,202 + j2,023) \Omega$$

5.2.2 Kabely vn „ W1 – W35 “

Příklad výpočtu pro kabel „ W1 “

- vstupní data viz zjednodušené přehledové schéma a tab. 4.4.2 parametry kabelů:

$$\text{typ 22 – AXEKCY, } 2 \times (3 \times 1 \times 240 \text{ mm}^2)$$

$$l = 570 \text{ m}$$

$$U_n = 22\,000 \text{ V}$$

$$R_{L20} = 0,125 \Omega/\text{km}$$

$$X_k = 0,113 \Omega/\text{km}$$

$$\theta_e = 90 \text{ }^{\circ}\text{C},$$

- impedance pro výpočet maximálního 3-f zkratového proudu:

rezistence R_L kabelu při teplotě $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dle kap. 2.1:

$$\underline{Z}_{W1} = l \cdot (R_{L20} + jX_k) = 0,570 \cdot \frac{1}{2} \cdot (0,125 + j0,113) = (0,0356 + j0,0324) \Omega$$

přepočet impedance na hladinu 6kV se realizuje tímto způsobem:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{W1-6kV} &= \underline{Z}_{W1} \cdot \frac{1}{t_r^2} = \underline{Z}_{W1} \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_n^1}{U_n^2}\right)^2} = (0,0356 + j0,0324) \cdot \frac{1}{\left(\frac{22}{6}\right)^2} \\ &= (0,00265 + j0,00241) \Omega \end{aligned}$$

- stanovení nejvyšší možné impedance pro výpočet minimálního 3-f a 2-f zkratového proudu:

rezistence R_L kabelu při nejvyšší provozní teplotě $\theta_e = 90 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dle kap. 2.1,

$$R_L = [1 + \alpha \cdot (\theta_e - 20 \text{ }^{\circ}\text{C})] \cdot R_{L20} = [1 + 0,004 \cdot (90 - 20)] \cdot 0,125 = 0,16 \Omega$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{W1max} &= l \cdot (\underline{Z}_{kmax}) = l \cdot (R_L + jX_k) = 0,570 \cdot \frac{1}{2} \cdot (0,16 + j0,113) \\ &= (0,0456 + j0,0324) \Omega \end{aligned}$$

Stejným postupem byly počítány i impedance ostatních kabelů. Stanovení nejvyšší možné impedance pro výpočet minimálního zkratového proudu bylo zapotřebí jen u kabelů W1, W7 a W14. Dále bylo nutné některé kabely přepočítat na jinou hladinu napětí. Všechny výsledky jsou uvedeny v tab 5.2.2.

Ozn. \underline{Z} v náhr. sch.	$\underline{Z}_W [\Omega]$	$\underline{Z}_{W-6kV} [\Omega]$	$\underline{Z}_{W-22kV} [\Omega]$	$\underline{Z}_{Wmax} [\Omega]$
\underline{Z}_{W1}	0,0356 + j 0,0324	0,00265 + j 0,0024	-	0,0456 + j 0,0324
\underline{Z}_{W2}	0,0038 + j 0,0034	0,00028 + j 0,0003	-	-
\underline{Z}_{W3}	0,0031 + j 0,0028	0,00023 + j 0,0002	-	-
\underline{Z}_{W4}	0,0025 + j 0,0023	0,00019 + j 0,0002	-	-
\underline{Z}_{W5}	0,0025 + j 0,0023	0,00019 + j 0,0002	-	-
\underline{Z}_{W6}	0,0031 + j 0,0028	0,00023 + j 0,0002	-	-
\underline{Z}_{W7}	0,005 + j 0,0046	0,00037 + j 0,0003	-	0,0064 + j 0,00455
\underline{Z}_{W8}	0,015 + j 0,0136	0,00112 + j 0,0010	-	-
\underline{Z}_{W9}	0,00056 + j 0,0013	0,08064 + j 0,1816	1,0842 + j 2,44096	-
\underline{Z}_{W10}	0,00052 + j 0,0012	0,07488 + j 0,1686	1,0067 + j 2,26661	-
\underline{Z}_{W11}	0,00068 + j 0,0015	0,09792 + j 0,2205	1,3165 + j 2,96402	-
\underline{Z}_{W12}	0,0018 + j 0,0041	0,2592 + j 0,58358	3,4848 + j 7,84594	-
\underline{Z}_{W13}	0,0019 + j 0,0043	0,2736 + j 0,61600	3,6784 + j 8,28183	-
\underline{Z}_{W14}	0,00095 + j 0,0005	-	0,0127 + j 0,00709	0,0011 + j 0,00053

\underline{Z}_{W15}	0,00044 + j 0,0010	0,0633 + j 0,14265	0,8518 + j 1,91790	-
\underline{Z}_{W16}	0,01525 + j 0,0204	-	-	-
\underline{Z}_{W17}	0,01525 + j 0,0204	-	-	-
\underline{Z}_{W18}	0,01525 + j 0,0204	-	-	-
\underline{Z}_{W19}	0,01525 + j 0,0204	-	-	-
\underline{Z}_{W20}	0,00793 + j 0,0106	-	-	-
\underline{Z}_{W21}	0,00793 + j 0,0106	-	-	-
\underline{Z}_{W22}	0,02257 + j 0,0302	-	-	-
\underline{Z}_{W23}	0,02258 + j 0,0126	-	-	-
\underline{Z}_{W24}	0,0011 + j 0,00248	0,1584 + j 0,35663	-	-
\underline{Z}_{W25}	0,0006 + j 0,00135	0,0864 + j 0,19453	-	-
\underline{Z}_{W26}	0,0012 + j 0,00270	0,1728 + j 0,38905	-	-
\underline{Z}_{W27}	0,0007 + j 0,00158	0,1008 + j 0,22695	-	-
\underline{Z}_{W28}	0,0045 + j 0,00252	-	-	-
\underline{Z}_{W29}	0,0123 + j 0,00683	-	-	-
\underline{Z}_{W30}	0,0183 + j 0,02450	-	-	-
\underline{Z}_{W31}	0,0065 + j 0,00360	-	-	-
\underline{Z}_{W32}	0,0058 + j 0,00324	-	-	-
\underline{Z}_{W33}	0,0029 + j 0,00388	0,4172 + j 0,55870	-	-
\underline{Z}_{W34}	0,0007 + j 0,00158	0,1008 + j 0,22695	-	-
\underline{Z}_{W35}	0,0008 + j 0,00180	0,1152 + j 0,25937	-	-
\underline{Z}_{W-M2}	0,03225 + j 0,00915	-	-	-

Tab. 5.2.2 - výsledné impedances kabelů

5.2.3 Dvouvinut'ové transformátory „ T1 až T1-508 “

Příklad výpočtu pro transformátor „ T7 “

- vstupní data viz tab. 4.4.1 parametry dvouvinut'ových transformátorů:

$$S_{rT} = 10 \text{ MVA}$$

$$U_{rTHV} = 22\,000 \text{ V}$$

$$U_{rTLV} = 6\,300 \text{ V}$$

$$I_{rTHV} = 262 \text{ A}$$

$$I_{rTLV} = 916 \text{ A}$$

$$P_{krT} = 60\,000 \text{ W}$$

$$u_{kr} = 7,02 \%$$

- stanovení impedance transformátoru na straně vyššího napětí:

$$Z_{T7HV} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}} = \frac{7,02}{100} \cdot \frac{22\,000^2}{10 \cdot 10^6} = 3,40 \, \Omega$$

$$R_{T7HV} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rTHV}^2} = \frac{60\,000}{3 \cdot 262^2} = 0,2914 \, \Omega$$

$$X_{T7HV} = \sqrt{Z_{T7HV}^2 - R_{T7HV}^2} = \sqrt{3,40^2 - 0,2914^2} = 3,3852 \, \Omega$$

$$\underline{Z}_{T7HV} = (R_{T7HV} + jX_{T7HV}) = (0,2914 + j3,3852) \, \Omega$$

- stanovení korekčního součinitele pro stranu vyššího napětí transformátoru:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0699} = 1,0029$$

$$x_T = \frac{X_{T7HV}}{\frac{U_{rTHV}^2}{S_{rT}}} = \frac{3,3852}{\frac{22\,000^2}{10 \cdot 10^6}} = 0,0699$$

$$\underline{Z}_{T7HVK} = K_T \cdot \underline{Z}_{T7HV} = 1,0029 \cdot (0,2914 + j3,3852) = (0,2922 + j3,3950) \, \Omega$$

- stanovení impedance transformátoru na straně nižšího napětí:

$$Z_{T7LV} = \frac{u_{kr}}{100\%} \cdot \frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}} = \frac{7,02}{100} \cdot \frac{6\,300^2}{10 \cdot 10^6} = 0,2786 \, \Omega$$

$$R_{T7LV} = \frac{P_{krT}}{3 \cdot I_{rTLV}^2} = \frac{60\,000}{3 \cdot 916^2} = 0,0238 \, \Omega$$

$$X_{T7LV} = \sqrt{Z_{T7LV}^2 - R_{T7LV}^2} = \sqrt{0,2786^2 - 0,0238^2} = 0,2776 \, \Omega$$

$$\underline{Z}_{T7LV} = (R_{T7LV} + jX_{T7LV}) = (0,0238 + j0,2776) \, \Omega$$

- stanovení korekčního součinitele pro stranu nižšího napětí transformátoru:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6 \cdot x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,0699} = 1,0029$$

$$x_T = \frac{X_{T7LV}}{\frac{U_{rTLV}^2}{S_{rT}}} = \frac{0,2776}{\frac{6\,300^2}{10 \cdot 10^6}} = 0,0699$$

$$\underline{Z}_{T7LVK} = K_T \cdot \underline{Z}_{T7LV} = 1,0029 \cdot (0,0238 + j0,2776) = (0,0239 + j0,2784) \, \Omega$$

Označení \underline{Z} v náhr. schématech	$\underline{Z}_{TLVK} [\Omega]$	$\underline{Z}_{THVK} [\Omega]$
\underline{Z}_{T1}	0,00149 + j 0,00994	2,62008 + j 17,45545
\underline{Z}_{T2}	0,00149 + j 0,00965	2,62284 + j 16,94297
\underline{Z}_{T3}	0,00149 + j 0,00994	2,62008 + j 17,45545
\underline{Z}_{T4}	0,00149 + j 0,00970	2,62238 + j 17,02849
\underline{Z}_{T5}	0,00149 + j 0,00997	2,61976 + j 17,51230
\underline{Z}_{T6}	0,00149 + j 0,00994	2,62008 + j 17,45545
\underline{Z}_{T7}	0,02391 + j 0,27841	0,29221 + j 3,39503
\underline{Z}_{T8}	0,02389 + j 0,28224	0,29204 + j 3,44175
\underline{Z}_{T11}	0,00149 + j 0,01047	2,61502 + j 18,39132
\underline{Z}_{T12}	0,00149 + j 0,01031	2,61655 + j 18,10821
\underline{Z}_{T1-1}	0,00149 + j 0,00979	0,19498 + j 1,27929
\underline{Z}_{T1-2}	0,00149 + j 0,00970	0,19505 + j 1,26658
\underline{Z}_{T1-3}	0,00149 + j 0,00988	0,19493 + j 1,28988
\underline{Z}_{T1-4}	0,00149 + j 0,00992	0,19489 + j 1,29622
\underline{Z}_{T1-220}	0,00228 + j 0,01576	0,30293 + j 2,05833
\underline{Z}_{T1-108}	0,00149 + j 0,00962	0,19511 + j 1,25598
\underline{Z}_{T1-158}	0,00149 + j 0,00975	0,19502 + j 1,27294
\underline{Z}_{T1-508}	0,00232 + j 0,01568	0,30362 + j 2,04808

Tab. 5.2.3 - výsledné impedance dvouvinutových transformátorů

5.2.4 Ekvivalentní motory skupin motorů nn 500 V

Příklad výpočtu pro ekvivalentní motor „eM1“

- vstupní data viz tab. 4.4.4 parametry ekvivalentních motorů nn 500 V:

$$\sum P_{rM} = 776 \text{ kW}$$

$$U_{rM} = 500 \text{ V}$$

$$I_{LR} / I_{rM} = 5$$

$$\eta_{rM} \cdot \cos \phi_{rM} = 0,85$$

$$Z_{eM1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{\frac{\sum P_{rM}}{\eta_{rM} \cdot \cos \phi_{rM}}} = \frac{1}{5} \cdot \frac{500^2}{\frac{776000}{0,85}} = 0,055 \Omega$$

pro skupiny nízkonapěťových motorů včetně připojovacích kabelů platí:

$$R_M/X_M = 0,42, \text{ s } X_M = 0,922 \cdot Z_M$$

$$X_{eM1} = 0,922 \cdot Z_{eM1} = 0,922 \cdot 0,055 = 0,050 \, \Omega$$

$$R_{eM1} = \sqrt{(Z_{eM1}^2 - X_{eM1}^2)} = \sqrt{(0,055^2 - 0,050^2)} = 0,021 \, \Omega$$

$$\underline{Z}_{eM1} = R_{eM1} + jX_{eM1} = (0,021 + j 0,050) \, \Omega$$

Ozn. \underline{Z} v náhr. sch.	$\underline{Z}_{eM} [\Omega]$	$\underline{Z}_{eM-6kV} [\Omega]$	$\underline{Z}_{eM-22kV} [\Omega]$
\underline{Z}_{eM1}	0,0212 + j 0,0505	3,0536 + j 7,2714	41,0541 + j 97,7605
\underline{Z}_{eM2}	0,0210 + j 0,0499	3,0186 + j 7,1881	40,5834 + j 96,6397
\underline{Z}_{eM3}	0,0156 + j 0,0371	2,2418 + j 5,3384	30,1400 + j 71,7712
\underline{Z}_{eM4}	0,0156 + j 0,0371	2,2461 + j 5,3485	30,1971 + j 71,9073
\underline{Z}_{eM5}	0,0146 + j 0,0347	2,0989 + j 4,9979	28,2179 + j 67,1941
\underline{Z}_{eM6}	0,0181 + j 0,0430	2,6011 + j 6,1939	34,9703 + j 83,2735
\underline{Z}_{eM7}	0,0225 + j 0,0535	3,2372 + j 7,7085	43,5218 + j 103,6368
\underline{Z}_{eM8}	0,0240 + j 0,0572	3,4593 + j 8,2374	46,5080 + j 110,7477
\underline{Z}_{eM9}	0,0452 + j 0,1077	6,5099 + j 15,5018	87,5219 + j 208,4125
\underline{Z}_{eM10}	0,0411 + j 0,0980	5,9240 + j 14,1066	79,6450 + j 189,6554
\underline{Z}_{eM11}	0,0490 + j 0,1166	7,0524 + j 16,7936	94,8154 + j 225,7802
\underline{Z}_{eM12}	0,0285 + j 0,0679	4,1068 + j 9,7793	55,2131 + j 131,4769
\underline{Z}_{eM13}	0,0140 + j 0,0332	2,0081 + j 4,7819	26,9983 + j 64,2899
\underline{Z}_{eM14}	0,0179 + j 0,0426	2,5757 + j 6,1333	34,6282 + j 82,4589

Tab. 5.2.4 - výsledné impedance ekvivalentních motorů skupin motorů nn 500 V

5.2.5 Asynchronní motory vn 6 kV

Příklad výpočtu pro skupinu asynchronních motorů „ΣM1“

- vstupní data pro motor MEZ D1N4 355 L-4 viz tab. 4.4.3 parametry asynchronních motorů vn:

$$P_{rM} = 200 \, kW$$

$$U_{rM} = 6000 \, V$$

$$I_{LR} / I_{rM} = 5,5$$

$$I_{rM} = 24,5 \, A$$

$$\eta_{rM} \cdot \cos\phi_{rM} = 0,78456$$

- Výpočet impedance samostatného motoru MEZ D1N4 355 L-4:

$$Z_{M1} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{S_{rM}} = \frac{1}{I_{LR}/I_{rM}} \cdot \frac{U_{rM}^2}{\frac{\Sigma P_{rM}}{\eta_{rM} \cdot \cos\phi_{rM}}} = \frac{1}{5,5} \cdot \frac{6000^2}{\frac{200000}{0,78456}} = 25,68 \, \Omega$$

pro motory vysokého napětí o výkonu P_{rM} na dvojici pólů $< 1 MW$ platí:

$$R_M/X_M = 0,15, \text{ s } X_M = 0,989 \cdot Z_M$$

$$X_{M1} = 0,989 \cdot Z_{M1} = 0,989 \cdot 25,68 = 25,39 \Omega$$

$$R_{M1} = \sqrt{(Z_{M1}^2 - X_{M1}^2)} = \sqrt{(25,68^2 - 25,39^2)} = 3,80 \Omega$$

$$\underline{Z}_{M1} = R_{M1} + jX_{M1} = (3,80 + j 25,39) \Omega$$

- Výpočet impedance skupiny motorů $\underline{Z}_{\Sigma M1}$:

$$\underline{Z}_{\Sigma M1} = \frac{1}{6} \cdot \underline{Z}_{M1} = \frac{1}{6} \cdot (3,80 + j 25,39) = (0,6330 + j 4,2324) \Omega$$

Ozn. \underline{Z} v náhr. sch.	Typ motorů	Počet motorů ve skupině	$\underline{Z}_{\Sigma M} [\Omega]$
$\underline{Z}_{\Sigma M1}$	MEZ D1N4 355 L-4	6x	0,6330 + j 4,2324
$\underline{Z}_{\Sigma M2}$	MEZ D1N4 355 X-4	5x	0,5862 + j 3,9196
$\underline{Z}_{\Sigma M3}$	MEZ D1N4 355 Y-4	3x	0,7608 + j 5,0870
$\underline{Z}_{\Sigma M4}$	MEZ D1K4 355 L-4	2x	1,8928 + j 12,6556
$\underline{Z}_{\Sigma M5}$	MEZ D1N4 355 Y-2	2x	1,0825 + j 7,2380
\underline{Z}_{M6}	SIEMENS 1AN4 355 V-4	1x	2,7566 + j 18,4314
$\underline{Z}_{\Sigma M7}$	MEZ D1K4 355 L-4	3x	1,2619 + j 8,437
$\underline{Z}_{\Sigma M8}$	MEZ D1N4 355 X-4	6x	0,4885 + j 3,2664
$\underline{Z}_{\Sigma M9}$	MEZ D1N4 355 Z-4	4x	0,4585 + j 3,0653

Tab. 5.2.5 - výsledné impedance skupin asynchronních motorů vn

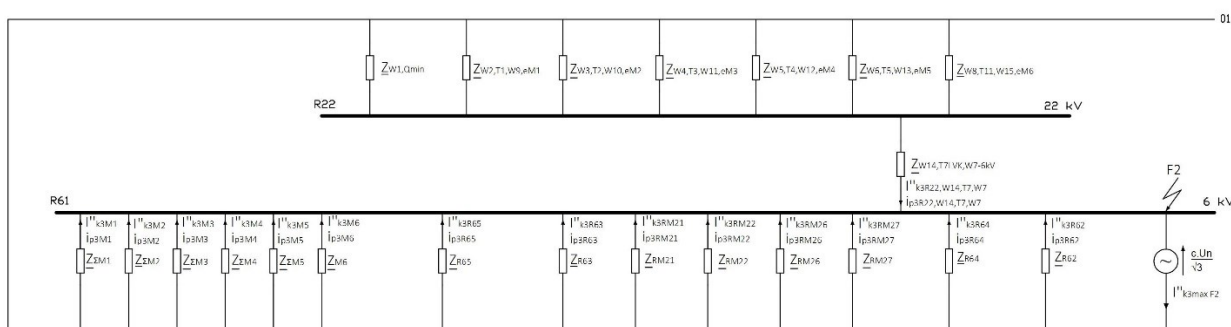
5.3 Výpočet zkratových proudů I''_{k3max} , I''_{k2min} , i_{p3} , I_{th}

Jelikož k celkovému zkratovému proudu ve všech třech případech (místo zkratu F1, F2 i F3) přispívá více zdrojů, které jsou radiálně připojené, dovoluje norma [4] určit celkový zkratový proud, jako součet proudů z jednotlivých větví. Norma [4] také dovoluje tento součet provést, buď v komplexním tvaru čísla nebo v absolutních hodnotách. Minimální zkratový proud může v řešené soustavě nastat v případě dvoufázového zkratu. I''_{k2min} se potom určí přepočtem z minimálního třífázového zkratového proudu I''_{k3min} dle místa zkratu. Ekvivalentní zkratový proud I_{th} se vypočítá pomocí I''_{k3max} dle postupu uvedeného v kap. 2.3.4.

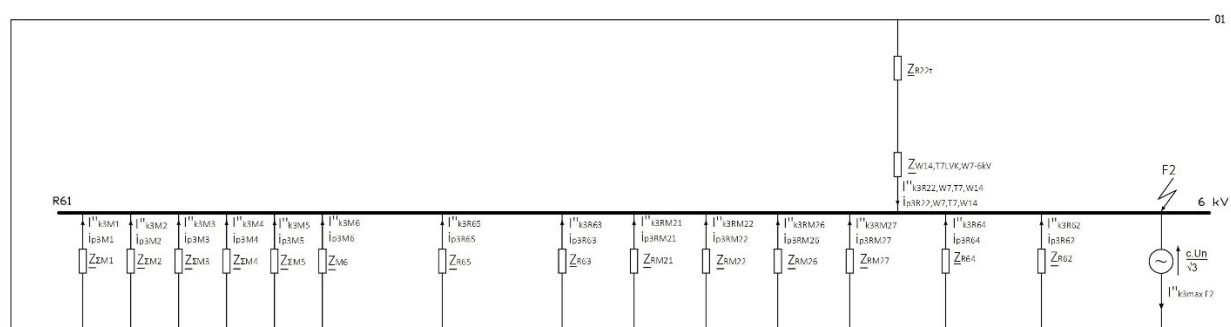
5.3.1 Výpočet zkratových proudů $I''_{k3max F2}$, $i_{p3 F2}$, $I_{th F2}$ v místě zkratu F2

Výpočet dílčích zkratových impedancí dle náhradních schémat

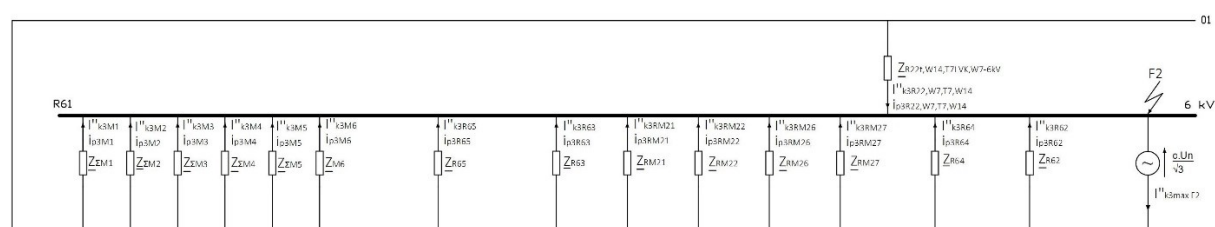
Výpočet zkratových impedancí jednotlivých větví zdrojů, které přispívají k celkovému zkratovému proudu $I''_{k3max F2}$ a $i_{p3 F2}$ se provede dle náhradního schéma č.4 na základě postupného zjednodušování sério-parelního řazení zkratových impedancí náhradního schématu na obr. 5.1.1. Celý postup zjednodušování je znázorněn v náhradních schématech č.2 až 4, viz obr. 5.3.1a – c.



Obr. 5.3.1a - náhradní schéma č.2 pro výpočet max. zkratového proudu v místě zkratu F2



Obr. 5.3.1b - náhradní schéma č.3 pro výpočet max. zkratového proudu v místě zkratu F2



Obr. 5.3.1c - náhradní schéma č.4 pro výpočet max. zkratového proudu v místě zkratu F2

Jako příklad je znázorněn výpočet zkratové impedance větve \underline{Z}_{R65} . Hodnoty zkratových impedancí jednotlivých prvků jsou brány z jednotlivých tabulek v kap. 5.2. Ostatní výsledky výpočtů zkratových impedancí větví budou uvedeny v přehledové tab. 5.3.1a.

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{R65} &= \left(\frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{eM12-6kV} + \underline{Z}_{W33-6kV} + \underline{Z}_{T1-220HVK} + \underline{Z}_{W29}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\Sigma M7}} + \frac{1}{\underline{Z}_{eM11-6kV} + \underline{Z}_{T1-508HVK} + \underline{Z}_{W28} + \underline{Z}_{W30}}} \right) \\ &+ \underline{Z}_{W16} = \left(\frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{eM12,W33,T1-220,W29}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\Sigma M7}} + \frac{1}{\underline{Z}_{eM11,T1-508HVK,W28,W30}}} \right) + \underline{Z}_{W16} = \\ &= \left(\frac{1}{\frac{1}{(4,8392 + j12,4031)} + \frac{1}{(1,2619 + j8,437)} + \frac{1}{(7,3788 + j18,8687)}} \right) \\ &+ (0,01525 + j0,0204) = (1,1007 + j4,04) \Omega\end{aligned}$$

$$\underline{Z}_{eM12,W33,T1-220,W29} = (4,1068 + j9,7793) + (0,4172 + j0,5587) + (0,30293 + j2,05833) + (0,0123 + j0,0068) = (4,8392 + j12,4031) \Omega$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{eM11,T1-508HVK,W28,W30} &= (7,0524 + j16,7936) + (0,30362 + j2,04808) + (0,0045 + j0,00252) \\ &+ (0,0183 + j0,0245) = (7,3788 + j18,8687) \Omega\end{aligned}$$

Ozn. \underline{Z} v náhr. sch.	$\underline{Z} [\Omega]$	Ozn. \underline{Z} v náhr. sch.	$\underline{Z} [\Omega]$
$\underline{Z}_{\Sigma M1}$	0,6330 + j 4,2324	\underline{Z}_{RM22}	3,7560 + j 9,7190
$\underline{Z}_{\Sigma M2}$	0,5862 + j 3,9196	\underline{Z}_{RM26}	6,7140 + j 16,8050
$\underline{Z}_{\Sigma M3}$	0,7608 + j 5,0870	\underline{Z}_{RM27}	6,2276 + j 15,6404
$\underline{Z}_{\Sigma M4}$	1,8928 + j 12,6556	\underline{Z}_{R64}	2,9143 + j 7,6991
$\underline{Z}_{\Sigma M5}$	1,0825 + j 7,2380	\underline{Z}_{R62}	0,2591 + j 1,5939
\underline{Z}_{M6}	2,7566 + j 18,4314	$\underline{Z}_{R22t,W14,T7LVK,W7-6kV}$	0,0377 + j 0,3678
\underline{Z}_{R65}	1,1007 + j 4,04		
\underline{Z}_{R63}	2,3258 + j 6,2888		
\underline{Z}_{RM21}	0,3911 + j 1,7099	$\underline{Z}_{k3 F2}$	0,0285 + j 0,1781

Tab. 5.3.1a - výsledné zkratové impedance dle náhr. sch. č.4

Výpočet celkové zkratové impedance $\underline{Z}_{k3 F2}$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{k3 F2} &= \left(\frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_{\Sigma M1}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\Sigma M2}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\Sigma M3}} + \frac{1}{\underline{Z}_{\Sigma M5}} + \frac{1}{\underline{Z}_{M6}} + \frac{1}{\underline{Z}_{R65}} + \frac{1}{\underline{Z}_{R63}} + \frac{1}{\underline{Z}_{RM21}} + \frac{1}{\underline{Z}_{RM22}} + \frac{1}{\underline{Z}_{RM26}} + \frac{1}{\underline{Z}_{RM27}} + \frac{1}{\underline{Z}_{R64}} + \frac{1}{\underline{Z}_{R62}} + \frac{1}{\underline{Z}_{R22t,W14,T7LVK,W7-6kV}}} \right) \\ &= 0,0285 + j0,1781 \Omega\end{aligned}$$

Výpočet jednotlivých příspěvků k celkovému zkratovému proudu $I''_{k3 \max F2}$ a $i_{p3 F2}$

Jako příklad uvedu výpočet příspěvku I''_{k3R65} , i_{p3R65} k celkovému zkratovému proudu v místě zkratu F2 na sběrnách v rozváděči R61 6kV.

- počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$I''_{k3R65} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{R65}} = \frac{1,1.6300}{\sqrt{3} \cdot (1,1007 + j4,04)} = (251,18 - j921,918) A$$

$$I''_{k3R65} = |251,18 - j921,918| = 956 A = \mathbf{0,956 kA}$$

- nárazový zkratový proud

součinitel κ se vypočítá dle kap.2.3.3 za použití vztahu $\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X}$, kde poměr R/X se stanoví ze zkratové impedance Z_{R65} , tzn.:

$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot (1,1/4,04)} = 1,45, \text{ pak } i_{p3R65} \text{ získáme ze vztahu:}$$

$$i_{p3R65} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3R65} = 1,45 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,956 = \mathbf{1,963 kA}$$

Stejným postupem budou stanoveny i ostatní příspěvky I''_{k3} a i_{p3} k celkovému zkratovému proudu v místě zkratu F2. Výsledky jsou uvedeny v přehledové tab. 5.3.1b.

Ozn. v náhr. sch.	$I''_{k3} [kA]$	Ozn. v náhr. sch.	$i_{p3} [kA]$
$I''_{k3 M1}$	0,935	$i_{p3 M1}$	2,182
$I''_{k3 M2}$	1,010	$i_{p3 M2}$	2,356
$I''_{k3 M3}$	0,778	$i_{p3 M3}$	1,815
$I''_{k3 M4}$	0,313	$i_{p3 M4}$	0,730
$I''_{k3 M5}$	0,547	$i_{p3 M5}$	1,276
$I''_{k3 M6}$	0,215	$i_{p3 M6}$	0,501
$I''_{k3 R65}$	0,956	$i_{p3 R65}$	1,963
$I''_{k3 R63}$	0,597	$i_{p3 R63}$	1,133
$I''_{k3 RM21}$	2,281	$i_{p3 RM21}$	4,882
$I''_{k3 RM22}$	0,384	$i_{p3 RM22}$	0,721
$I''_{k3 RM26}$	0,221	$i_{p3 RM26}$	0,411
$I''_{k3 RM27}$	0,238	$i_{p3 RM27}$	0,443
$I''_{k3 R64}$	0,486	$i_{p3 R64}$	0,917
$I''_{k3 R62}$	2,478	$i_{p3 R62}$	5,683
$I''_{k3 R22, W14, T7, W7}$	10,821	$i_{p3 R22, W14, T7, W7}$	26,637

Tab. 5.3.1b - výsledky dílčích zkratových proudů dle náhr. sch. č.4

Výpočet $I''_{k3 \max F2}$, $i_{p3 F2}$, $I_{th F2}$

- počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$\begin{aligned} I''_{k3 \max F2} &= I''_{k3 M1} + I''_{k3 M2} + I''_{k3 M3} + I''_{k3 M4} + I''_{k3 M5} + I''_{k3 M6} + I''_{k3 R65} + I''_{k3 R63} + I''_{k3 RM21} \\ &\quad + I''_{k3 RM22} + I''_{k3 RM26} + I''_{k3 RM27} + I''_{k3 R64} + I''_{k3 R62} + I''_{k3 R22, W14, T7, W7} \\ &= 0,935 + 1,010 + 0,778 + 0,313 + 0,547 + 0,215 + 0,956 + 0,597 \\ &\quad + 2,281 + 0,384 + 0,221 + 0,238 + 0,486 + 2,478 + 10,821 \\ &= \mathbf{22,189 \text{ kA}} \end{aligned}$$

- nárazový zkratový proud

$$\begin{aligned} i_{p3 F2} &= i_{p3 M1} + i_{p3 M2} + i_{p3 M3} + i_{p3 M4} + i_{p3 M5} + i_{p3 M6} + i_{p3 R65} + i_{p3 R62} + \\ &\quad i_{p3 RM21} + i_{p3 RM22} + i_{p3 RM26} + i_{p3 RM27} + i_{p3 R64} + i_{p3 R62} + i_{p3 R22, W14, T7, W7} = 2,182 + \\ &\quad 2,356 + 1,815 + 0,730 + 1,276 + 0,501 + 1,963 + 1,133 + 4,882 + 0,721 + 0,411 + \\ &\quad 0,443 + 0,917 + 5,683 + 26,637 = \mathbf{51,650 \text{ kA}} \end{aligned}$$

- ekvivalentní oteplovací proud

* pozn.: předpokládá se doba trvání zkratu T_k po dobu 1s a po dobu 0,1 s. Příspěvek asynchronních motorů k ustálenému zkratovému proudu I_k při trojfázovém zkratu je nulový, tzn. $I''_k = I_k$. Součinitelé „m“ a „n“ z obr. 2.3.4a – b se tedy určí následovně: koeficient $m = 0,05$ (pto $T_k = 1 \text{ s}$), koeficient $m = 0,2$ (pto $T_k = 0,1 \text{ s}$) a koeficient $n = 1$, protože $I''_k / I_k = 1$.

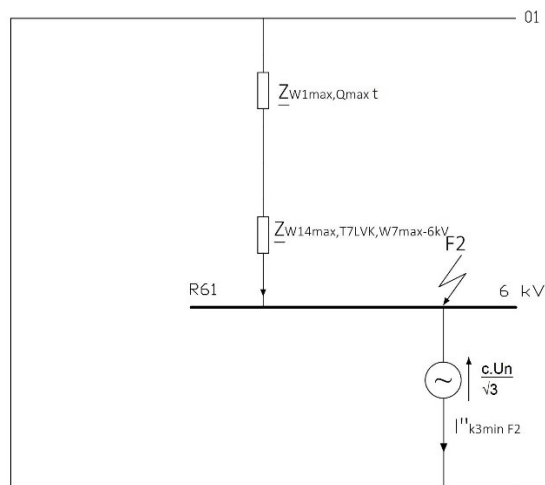
$$I_{th F2 (1s)} = I''_{k3 \max F2} \cdot \sqrt{m + n} = 22,189 \cdot \sqrt{0,05 + 1} = \mathbf{22,737 \text{ kA}}$$

$$I_{th F2 (0,1s)} = I''_{k3 \max F2} \cdot \sqrt{m + n} = 22,189 \cdot \sqrt{0,2 + 1} = \mathbf{24,306 \text{ kA}}$$

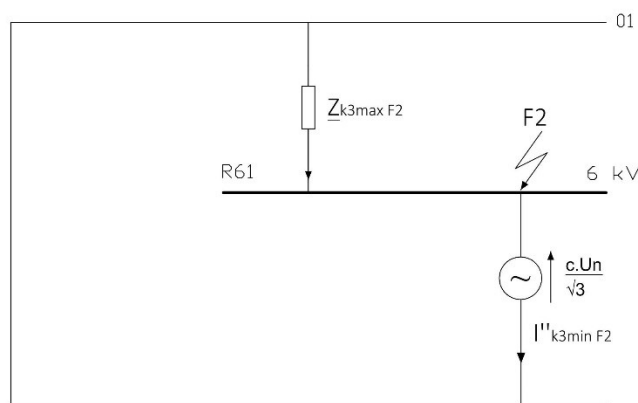
5.3.2 Výpočet minimálního zkratového proudu $I''_{k2 \min F2}$ v místě zkratu F2

Výpočet celkové zkratové impedance obvodu

Výpočet celkové zkratové impedance $Z_{k3 \max F2}$ pro výpočet $I''_{k3 \min F2}$ se opět provede postupným zjednodušováním dle níže uvedených náhradních schémat č.1 a č.2 na obr. 5.3.2a - b.



Obr. 5.3.2a - náhradní schéma č.1 pro výpočet min. zkratového proudu v místě zkratu F2



Obr. 5.3.2b - náhradní schéma č.2 pro výpočet min. zkratového proudu v místě zkratu F2

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{k3 \max F2} &= \underline{Z}_{W1 \max, Q \max t} + \underline{Z}_{W14 \max, T7LVK, W7 \max - 6kV} \\ &= (0,0184 + j0,1529) + (0,0255 + j0,2793) = \mathbf{(0,0440 + j0,4322) \Omega}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{W1 \max, Q \max t} &= (\underline{Z}_{W1 \max} + \underline{Z}_{Q \max}) \cdot \frac{1}{t_r^2} = (\underline{Z}_{W1 \max} + \underline{Z}_{Q \max}) \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_n^1}{U_n^2}\right)^2} \\ &= [(0,0456 + j0,0324) + (0,202 + j2,023)] \cdot \frac{1}{\left(\frac{22}{6}\right)^2} \\ &= \mathbf{(0,0184 + j0,1529) \Omega}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{W14max,T7LVK,W7max-6kV} &= \underline{Z}_{W14max} + \underline{Z}_{T7LVK} + \underline{Z}_{W7max-6kV} \\ &= (0,0011 + j0,00053) + (0,02391 + j0,27841) \\ &\quad + (0,00048 + j0,00034) = (0,0255 + j0,2793) \Omega\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{W7max-6kV} &= \underline{Z}_{W7max} \cdot \frac{1}{p^2} = \underline{Z}_{W7max} \cdot \frac{1}{\left(\frac{U_n^1}{U_n^2}\right)^2} = (0,0064 + j0,00455) \cdot \frac{1}{\left(\frac{22}{6}\right)^2} \\ &= (0,00048 + j0,00034) \Omega\end{aligned}$$

Výpočet $I''_{k3min F2}$, $I''_{k2min F2}$

- trífázový zkrat

$$I''_{k3min F2} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{k3max F2}} = \frac{1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot (0,0440 + j0,4322)} = (847 - j8330) A$$

$$I''_{k3min F2} = |847 - j8330| = 8373 A = \mathbf{8,373 kA}$$

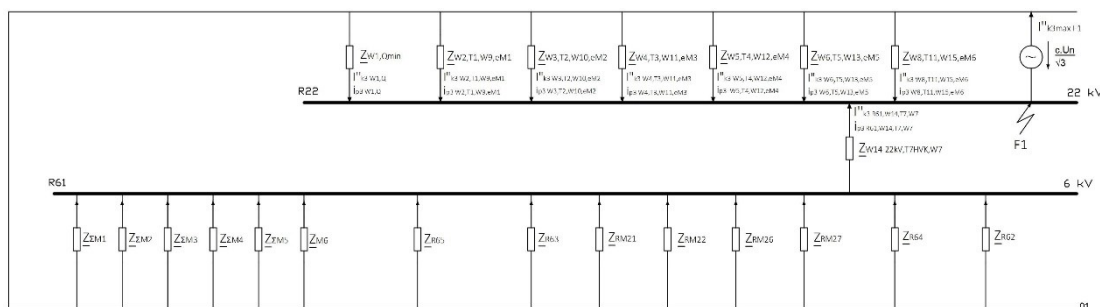
- dvoufázový zkrat

$$I''_{k2min F2} = I''_{k3min F2} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 8,373 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = \mathbf{7,251 kA}$$

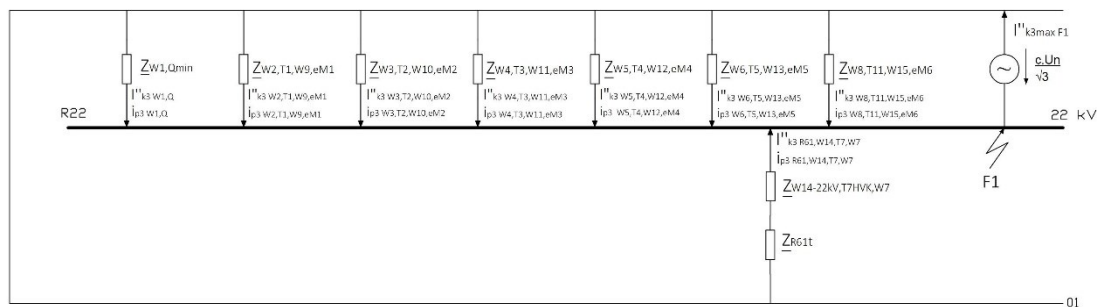
5.3.3 Výpočet zkratových proudů $I''_{k3max F1}$, $i_{p3 F1}$, $I_{th F1}$ v místě zkratu F1

Výpočet zkratových impedancí jednotlivých větví, stanovení jednotlivých zkratových proudů, které přispívají k celkovému zkratovému proudu vč. stanovení celkového zkratového proudu je proveden stejným postupem jako v předcházejících kap. 5.3.1 a 5.3.2 pro případ místa zkratu F2. Uvedu zde, proto pouze jednotlivé výsledky v přehledových tabulkách bez příkladů výpočtu.

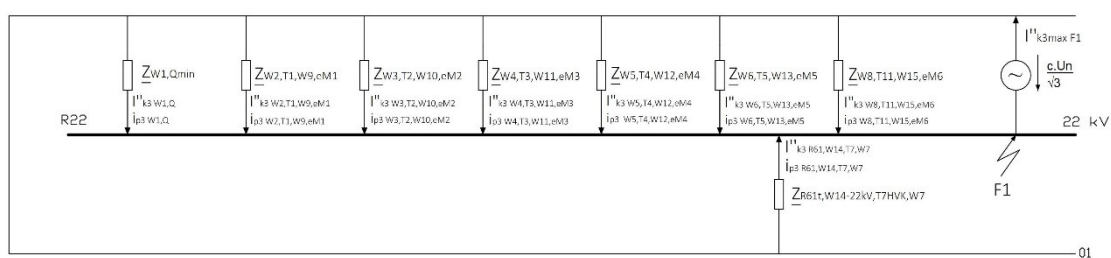
Výpočet dílčích zkratových impedancí dle náhradních schémat



Obr. 5.3.3a - náhradní schéma č.2 pro výpočet max. zkratového proudu v místě zkratu F1



Obr. 5.3.3b - náhradní schéma č.3 pro výpočet max. zkratového proudu v místě zkratu F1



Obr. 5.3.3c - náhradní schéma č.4 pro výpočet max. zkratového proudu v místě zkratu F1

Ozn. \underline{Z} v náhr. sch.	$\underline{Z} [\Omega]$
$\underline{Z}_{W1,Qmin}$	0,1599 + j 1,2748
$\underline{Z}_{W2,T1,W9,eM1}$	44,7621 + j 117,6603
$\underline{Z}_{W3,T2,W10,eM2}$	44,2161 + j 115,8521
$\underline{Z}_{W4,T3,W11,eM3}$	34,0791 + j 92,1930
$\underline{Z}_{W5,T4,W12,eM4}$	36,3068 + j 96,7840
$\underline{Z}_{W6,T5,W13,eM5}$	34,5192 + j 92,9911
$\underline{Z}_{W8,T11,W15,eM6}$	38,4522 + j 103,5964
$\underline{Z}_{R61t,W14-22kV,T7HV,K,W7}$	1,3057 + j 8,0185
$\underline{Z}_{k3 F1}$	0,1490 + j 1,0365

Tab. 5.3.3a - výsledné zkratové impedance dle náhr. sch. č.4

Výpočet jednotlivých příspěvků k celkovému zkratovému proudu $I''_{k3 \max F1}$ a $i_{p3 F1}$

Ozn. v náhr. sch.	$I''_{k3} [kA]$	Ozn. v náhr. sch.	$i_{p3} [kA]$
$I''_{k3 W1,Q}$	11,369	$i_{p3 W1,Q}$	27,217
$I''_{k3 W2,T1,W9,eM1}$	0,116	$i_{p3 W2,T1,W9,eM1}$	0,219
$I''_{k3 W3,T2,W10,eM2}$	0,118	$i_{p3 W3,T2,W10,eM2}$	0,222
$I''_{k3 W4,T3,W11,eM3}$	0,149	$i_{p3 W4,T3,W11,eM3}$	0,282
$I''_{k3 W5,T4,W12,eM4}$	0,141	$i_{p3 W5,T4,W12,eM4}$	0,267
$I''_{k3 W6,T5,W13,eM5}$	0,147	$i_{p3 W6,T5,W13,eM5}$	0,279
$I''_{k3 W8,T11,W15,eM6}$	0,132	$i_{p3 W8,T11,W15,eM6}$	0,251
$I''_{k3 R61,W14,T7,W7}$	1,798	$i_{p3 R61,W14,T7,W7}$	4,122

Tab. 5.3.3b - výsledky dílčích zkratových proudů dle náhr. sch. č.4

Výpočet $I''_{k3 \max F1}$, $i_{p3 F1}$, $I_{th F1}$

- počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$\begin{aligned}
 I''_{k3 \max F1} &= I''_{k3 W1,Q} + I''_{k3 W2,T1,W9,eM1} + I''_{k3 W3,T2,W10,eM2} + I''_{k3 W4,T3,W11,eM3} \\
 &\quad + I''_{k3 W5,T4,W12,eM4} + I''_{k3 W6,T5,W13,eM5} + I''_{k3 W8,T11,W15,eM6} \\
 &\quad + I''_{k3 R61,W14,T7,W7} \\
 &= 11,369 + 0,116 + 0,118 + 0,149 + 0,141 + 0,147 + 0,132 + 1,798 \\
 &= \mathbf{13,950 \text{ kA}}
 \end{aligned}$$

- nárazový zkratový proud

$$\begin{aligned}
 i_{p3 F1} &= i_{p3 W1,Q} + i_{p3 W2,T1,W9,eM1} + i_{p3 W3,T2,W10,eM2} + i_{p3 W4,T3,W11,eM3} + \\
 &\quad i_{p3 W5,T4,W12,eM4} + i_{p3 W6,T5,W13,eM5} + i_{p3 W8,T11,W15,eM6} + i_{p3 R61,W14,T7,W7} = 27,217 + \\
 &\quad 0,219 + 0,222 + 0,282 + 0,267 + 0,279 + 0,251 + 4,122 = \mathbf{32,860 \text{ kA}}
 \end{aligned}$$

- ekvivalentní oteplovací proud

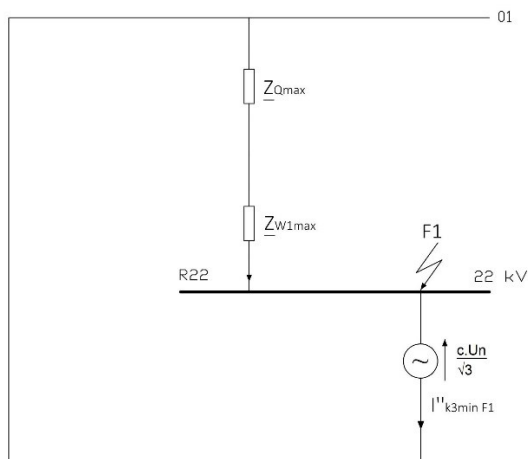
* pozn.: ekvivalentní oteplovací proud v místě zkratu F1 je stanoven za stejných předpokladů jako pro místo zkratu F2 pro $T_k = 1 \text{ s}$ v kap. 5.3.1.

$$I_{th F1 (1s)} = I''_{k3 \max F1} \cdot \sqrt{m+n} = 13,950 \cdot \sqrt{0,05+1} = \mathbf{14,294 \text{ kA}}$$

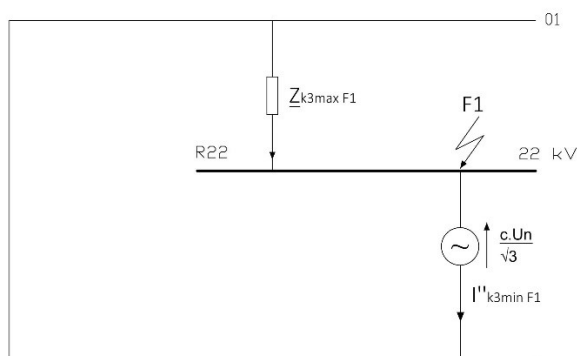
5.3.4 Výpočet minimálního zkratového proudu $I''_{k2min F1}$ v místě zkratu F1

Výpočet celkové zkratové impedance obvodu

Výpočet celkové zkratové impedance $\underline{Z}_{k3max F1}$ pro výpočet $I''_{k3min F1}$ se opět provede postupným zjednodušováním dle níže uvedených náhradních schémat č.1 a č.2 na obr. 5.3.4a - b.



Obr. 5.3.4a - náhradní schéma č.1 pro výpočet min. zkratového proudu v místě zkratu F1



Obr. 5.3.4b - náhradní schéma č.2 pro výpočet min. zkratového proudu v místě zkratu F1

$$\begin{aligned}\underline{Z}_{k3 \max F1} &= (\underline{Z}_{W1max} + \underline{Z}_{Qmax}) = (0,0456 + j0,0324) + (0,202 + j2,023) \\ &= (0,2479 + j2,0558) \Omega\end{aligned}$$

Výpočet $I''_{k3min F1}$, $I''_{k2min F1}$

- třífázový zkrat

$$I''_{k3 \min F1} = \frac{c_{min} \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \underline{Z}_{k3 \max F1}} = \frac{1 \cdot 23000}{\sqrt{3} \cdot (0,2479 + j2,0558)} = (767 - j6367) A$$

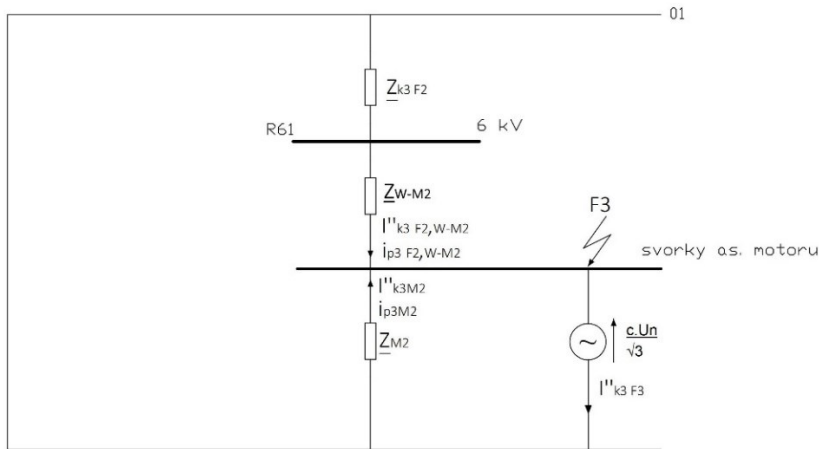
$$I''_{k3 \min F1} = |767 - j6367| = 6413 A = 6,413 kA$$

- dvoufázový zkrat

$$I''_{k2 \min F1} = I''_{k3 \min F1} \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 6,413 \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = 5,554 \text{ kA}$$

5.3.5 Výpočet zkratových proudů $I''_{k3 F3}$, $i_{p3 F3}$ v místě zkratu F3

Vychází se z náhradního schématu na obr. 5.3.5. Zkratový proud $I''_{k3 F3}$ a $i_{p3 F3}$ je tvořen příspěvkem zkratového proudu motoru $I''_{k3 M2}$, $i_{p3 M2}$ a příspěvkem zkratového proudu $I''_{k3 F2, W-M2}$ a $i_{p3 F2, W-M2}$ ze sběrnic R61 6kV, který protéká přívodním kabelem W-M2 motoru k jeho svorkám.



Obr. 5.3.5 - náhradní schéma pro výpočet 3-f zkratu na svorkách asynchronního motoru M2

Výpočet zkratových impedancí

$$Z_{k3 F2, W-M2} = (0,0285 + j0,1781) + (0,03225 + j0,00915) = (0,0608 + j0,1873) \Omega$$

$$Z_{W-M2} = (0,03225 + j0,00915) \Omega$$

$$Z_{k3 F2} = (0,0285 + j0,1781) \Omega$$

$$Z_{M2} = (2,9311 + j19,5982) \Omega$$

Výpočet zkratového proudu $I''_{k3 F3}$ a $i_{p3 F3}$

- počáteční souměrný rázový zkratový proud

$$I''_{k3 F3} = I''_{k3 F2, W-M2} + I''_{k3 M2} = 20,325 + 0,202 = 20,527 \text{ kA}$$

$$I''_{k3 F2, W-M2} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{k3 F2, W-M2}} = \frac{1,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot (0,0608 + j0,1873)} = (6272 - j19333) \text{ A}$$

$$I''_{k3 F2, W-M2} = |6272 - j19333| = 20\,325 \text{ A} = 20,325 \text{ kA}$$

$$I''_{k3 M2} = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_{M2}} = \frac{1,1 \cdot 6300}{\sqrt{3} \cdot (2,9311 + j19,5982)} = (30 - j200) A$$

$$I''_{k3 M2} = |30 - j200| = 202 A = \mathbf{0,202 kA}$$

- nárazový zkratový proud

$$i_{p3 F3} = i_{p3 F2, W-M2} + i_{p3 M2} = 41,679 + 0,471 = \mathbf{42,150 kA}$$

$$\kappa_{F2, W-M2} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot (0,0608/0,1873)} = 1,39$$

$$i_{p3 F2, W-M2} = \kappa_{F2, W-M2} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3 F2, W-M2} = 1,39 \cdot \sqrt{2} \cdot 20,325 = \mathbf{41,679 kA}$$

$$\kappa_{M2} = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} = 1,02 + 0,98e^{-3 \cdot (0,15)} = 1,65$$

$$i_{p3 M2} = \kappa_{M2} \cdot \sqrt{2} \cdot I''_{k3 M2} = 1,65 \cdot \sqrt{2} \cdot 0,202 = \mathbf{0,471 kA}$$

5.3.6 Výsledky výpočtů zkratových poměrů na rozvodně R22 kV

3-f zkrat v místě F1		3-f zkrat v místě F2		3-f zkrat v místě F3	
$I''_{k3max F1}$	13,950 kA	$I''_{k3max F2}$	22,189 kA	$I''_{k3 F3}$	20,527 kA
$i_{p3 F1}$	32,860 kA	$i_{p3 F2}$	51,650 kA	$i_{p3 F3}$	42,150 kA
$I_{th F1 (1s)}$	14,294 kA	$I_{th F2 (1s)}$	22,737 kA		
		$I_{th F2 (0,1s)}$	24,306 kA	$I''_{k3 F2, W-M2}$	20,325 kA
$I''_{k2min F1}$	5,554 kA	$I''_{k2min F2}$	7,251 kA	$I''_{k3 M2}$	0,202 kA

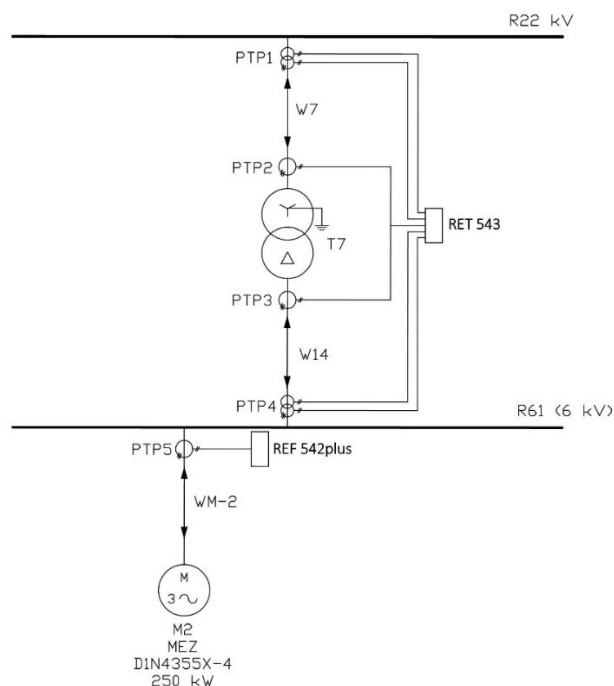
Tab. 5.3.6 - výsledky výpočtů zkratových poměrů na rozvodně R22 kV

6. Návrh nových elektrických ochran [1] [9]

Jak už bylo zmíněno v úvodu diplomové práce a je nyní vidět na obr. 6, částečný návrh modernizace systému chránění se bude týkat výměny původních el. ochran u hlavních transformátorů s podnikovým označením T7 a T8 a výměny ochran motorových vývodů v rozváděči R61 6 kV. Po dlouhém zvažování a vybírání napříč jednotlivými výrobci ochran, jako je ABB, Schneider electric a Siemens, jsem zvolil pro výběr nových digitálních ochran firmu ABB. Pro tuto variantu jsem se rozhodl, díky dobré přístupnosti technické dokumentace, jejíž součástí byly i vhodné příklady výpočtů nastavení ochranných funkcí pro různé aplikace.

U transformátorů navrhuji nasazení terminálů chránění RET 543, jako náhradu za původní dig. ochrany SPAJ 140C (na straně 22 kV a straně 6 kV) a za původní elektromechanické diferenciální ochrany RAX 1. Terminály budou plnit funkci komplexní ochrany tzn., že každý z transformátorů T7 a T8 bude vybaven jedním terminálem RET 543, v kterém budou nastaveny nadproudové a diferenciální funkce pro ochranu transformátorů před vnějšími a vnitřními poruchami. Nadproudové funkce tedy budou na straně vyššího napětí 22 kV oba transformátory chránit vůči přetížením, průchozím zkratům a zároveň budou zálohovat diferenciální ochranu. Na straně nižšího napětí budou nadproudové funkce terminálů chránit proti přetížení, vypínat zkraty a zálohovat podružné ochrany na přípojnicích 6 kV.

V případě motorových vývodů na přípojnici 6 kV v rozváděči R61 navrhuji za původní elektromechanické ochrany typu AB21, nasadit terminály vývodových polí REF 542plus. Tyto terminály jsem volil, kvůli motorovým ochranným funkcím, kterými jsou tyto terminály vybaveny nad rámec standardních proudových, napěťových a ostatních ochranných funkcí. Jedná se zejména o tyto ochranné funkce: tepelná funkce ochrany motoru (tepelný model), ochrana počtu startů motoru, ochranná funkce při zablokovaném rotoru a ochrana rozběhu motoru.



Obr. 6 - znázornění navrhovaných elektrických ochran

6.1 Popis navrhovaných elektrických ochran

6.1.1 Terminál transformátoru ABB RET 54_ [10]

Terminály transformátoru RET 541/543/545 jsou určeny k chránění, ovládání, měření a monitorování dvouvinutových transformátorů a bloků generátor – transformátor, které jsou instalovány v distribučních sítích. Terminály RET 54_ je také možné použít ve ztížených pracovních podmínkách, jaké jsou například v těžkém průmyslu, v lodních i pobřežních aplikacích.

Funkce terminálu transformátoru RET 54_ jsou rozděleny do následujících kategorií:

- Ochranné funkce
- Měřicí funkce
- Řídící/ovládací funkce
- Funkce monitorující provozní podmínky
- Komunikační funkce
- Univerzální funkce
- Standardní funkce jsou dále rozděleny do tří podskupin, které přísluší různým funkčním úrovním (Control, Basic, Multi), viz. tab. 6.1.1a.

Hlavní ochranná funkce je třífázová proudová diferenciální ochrana se stabilizovaným stupněm a mžikovým stupněm, která je určena pro rychlé a selektivní chránění při zkratech ve vinutí i při mezizávitových poruchách. Stabilizovaný stupeň kromě blokování 2. a 5. harmonickou složkou také obsahuje blokovací/deblokovací funkci, která rozlišuje a vyhodnocuje průběh měřené veličiny. Ochrana dokáže spolehlivě vypínat i s částečně přesycenými transformátory proudu, tj. zabezpečuje vypnutí s krátkými vypínacími časy při poruchách v chráněné zóně a současně vykazuje vysokou stabilitu při externích poruchách. S ochranou není nutné používat žádné pomocné transformátory proudu. Přizpůsobení funkce k jakékoli vektorové skupině a korekce převodů transformátorů proudu v širokém rozsahu zajišťuje implementace příslušných číslicových algoritmů a stejně je zajištěna i eliminace nulové složky proudu, která brání nežádoucímu vypnutí při zemních poruchách mimo chráněnou oblast.

Ve verzi terminálu *Basic* jsou kromě diferenciální ochrany obsaženy následující ochrany: Zemní ochrana s vymezenou zónou (vysokoimpedanční nebo číslicově stabilizovaná funkce), ochrana proti nesymetrickému zatížení nebo tepelnému přetížení, třífázová nadproudová a záložní zemní nesměrová ochrana s nezávislým časovým zpožděním a IDMT charakteristikami pro obě strany transformátoru.

Verze terminálu *Multi* navíc k výše uvedenému obsahuje přepětovou ochranu a podpětovou ochranu, přepětovou funkci vyhodnocující nulovou složku napětí, podfrekvenční i nadfrekvenční funkci, ochranu proti přesycení, zemní směrovou ochranu, směrovou nadproudovou ochranu a záložní podimpedanční ochranu vedení. Tyto funkce splňují většinu aplikačních požadavků.

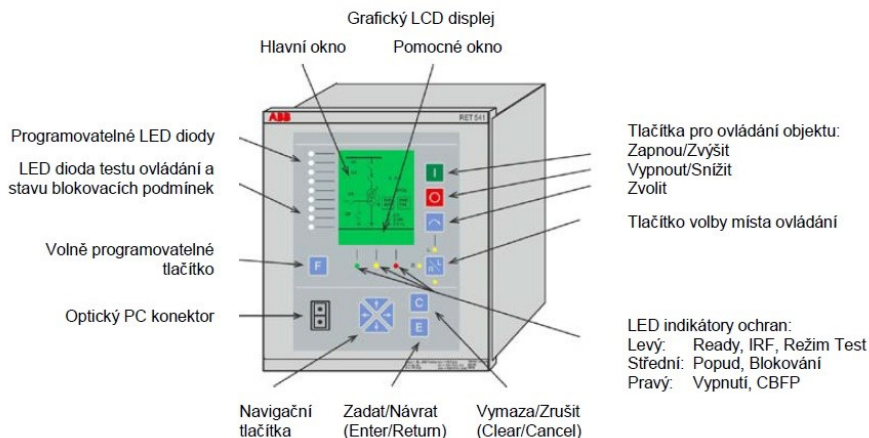
IEEE kód	IEC symbol	Funkce, které jsou dostupné v terminálech RET 541/543/545. Kapacita procesoru musí být zkontrolována pomocí nástroje "CPU Load Tool".	Kód	RET 541/3/5 CONTROL	RET 541/3/5 BASIC	RET 541/3/5 MULTI
Zkratky a nadproudy						
87	3ΔI>, 3ΔI>>	Třířázová diferenciální ochrana transformátorů, stabilizovaný a mžikový stupeň			X	X
51	3I>	Třířázová nesměrová nadproudová, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti	NOC3Low			
50/51/51B	3I>>	Třířázová nesměrová nadpr., stupeň s vyšším rozsahem/lze blokovat nadproudem	NOC3High		X	X
50/51B	3I>>>	Třířázová nesměrová nadproudová, mžikový stupeň/lze blokovat nadproudem	NOC3Inst			
		Třířázová nesměrová nadproudová, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti (B)	NOC3LowB			
67	3I>→	Třířázová směrová nadproudová, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti	DOC6Low			
67	3I>→→	Třířázová směrová nadpr., stupeň s vyšším rozsahem/lze blokovat nadproudem	DOC6High			X
67	3I>→→→	Třířázová směrová nadproudová, mžikový stupeň/lze blokovat nadproudem	DOC6Inst			
21G	Z<	Třířázová podimpedanční ochrana, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti	UI6Low			X
21G	Z<<	Třířázová podimpedanční ochrana, stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti	UI6High			
Zemní poruchy						
51N	Io>/SEF	Nesměrová zemní, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti	NEF1Low			
50N/51N	Io>>	Nesměrová zemní, stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti	NEF1High		X	X
50N	Io>>>	Nesměrová zemní, mžikový stupeň	NEF1Inst			
67N/51N	Io>/SEF →	Směrová zemní, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti	DEF2Low			
67N	Io>> →	Směrová zemní, stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti	DEF2High			X
67N	Io>>> →	Směrová zemní, mžikový stupeň	DEF2Inst			
59N	Uo>	Přepětová (měření nulové složky napětí), stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti	ROV1Low			
59N	Uo>>	Přepětová (měření nulové složky napětí), stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti	ROV1High			X
59N	Uo>>>	Přepětová (měření nulové složky napětí), mžikový stupeň	ROV1Inst			
87N	ΔIo>	Stabilizovaná zemní ochrana s vymezenou zónou (strana velmi vysokého napětí)	REF4A			
87N	ΔIo>>	Stabilizovaná zemní ochrana s vymezenou zónou (strana vysokého napětí)	REF4B		X	X
87N	ΔIo>, REF	Vysokoimpedanční zemní ochrana s vymezenou zónou	REF1A			
Přetížení/nesymetrické zatížení						
49T	3I ₂	Třířázová ochrana proti tepelnému přetížení	TOL3Dev		X	X
46	I ₂ >	Ochrana vyhodnocující zpětnou složku (NPS), st. s nižším rozsahem seřiditelnosti	NPS3Low		X	X
46	I ₂ >>	Ochrana vyhodnocující zpětnou složku (NPS), st. s vyšším rozsahem seřiditelnosti	NPS3High			
Přepětí/podpětí						
59	3UI>	Třířázová přepětová, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti	OV3Low			X
59	3UI>>	Třířázová přepětová, stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti	OV3High			
27	3UI<	Třířázová podpětová, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti	UV3Low			X
27	3UI<<	Třířázová podpětová, stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti	UV3High			
47	U1< & U2> & U1>	Třířázová ochrana vyhodnocující souslednou a zpětnou složku napětí, stupeň 1	PSV3St1			X
47	U1< & U2> & U1>	Třířázová ochrana vyhodnocující souslednou a zpětnou složku napětí, stupeň 2	PSV3St2			
Nadfrekvence/podfrekvence						
81U/810	f</f>/df/dt	Podfrekvenční nebo nadfrekvenční vč. funkce rychlosti změny frekvence, stupeň 1	Freq1St1			
81U/810	f</f>/df/dt	Podfrekvenční nebo nadfrekvenční vč. funkce rychlosti změny frekvence, stupeň 2	Freq1St2			
81U/810	f</f>/df/dt	Podfrekvenční nebo nadfrekvenční vč. funkce rychlosti změny frekvence, stupeň 3	Freq1St3			X
81U/810	f</f>/df/dt	Podfrekvenční nebo nadfrekvenční vč. funkce rychlosti změny frekvence, stupeň 4	Freq1St4			
81U/810	f</f>/df/dt	Podfrekvenční nebo nadfrekvenční vč. funkce rychlosti změny frekvence, stupeň 5	Freq1St5			
Přebuzení (přesycení)						
24	U/f>	Ochrana proti přebuzení (přesycení), stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti U/f>	OE1Low			X
24	U/f>>	Ochrana proti přebuzení (přesycení), stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti U/f>>	OE1High			
Doplňkové funkce						
68	3I2f>	Třířázový detektor zapínacího proudu	Inrush3		X	X
60	FUSEF	Kontrolní funkce poruchy pojistek (jističů)	Fuse Fail			X
62BF	CBFP	Ochrana při selhání vypínače	-		X	X

Tab. 6.1.1a - přehled ochranných funkcí jednotlivých úrovní vybavení terminálu RET 54_

Terminály RET 54_ mohou měřit dvě sady třířázových proudů, sdružená nebo fázová napětí, nulový proud, nulovou složku napětí, frekvenci a účinník. Prostřednictvím funkce monitorování provozních podmínek, terminál monitoruje například vypínací obvody, tlak plynu ve vypínači, opotřebení vypínače a poskytuje informace potřebné pro plánování intervalů údržby zařízení.

K dispozici je i karta RTD1 jako doplňkové vybavení terminálů RET 541 a RET 543. Jedná se o univerzální vstupní analogový modul, který umožňuje například sledování stavu přepínače odboček, monitorování horní a dolní úrovně teploty oleje pomocí RTD čidel i zavedení informace o okolní teplotě do ochrany proti tepelnému přetížení, a tak zvyšuje přesnost této funkce.

Prostřednictvím grafického HMI displeje a ovládacích funkcí implementovaných v terminálu transformátoru jsou místně indikovány polohy odpojovačů, vypínačů a přepínače odboček. Místní ovládání těchto objektů je možné pomocí tlačítek na čelním panelu terminálu. Terminál kromě toho umožňuje dálkový přenos stavových informací o objektech na vzdálený řídicí systém. Ze vzdáleného řídicího systému je také možné vypínat a zapínat dálkově ovladatelné prvky.



Obr. 6.1.1 - čelní pohled na terminál transformátoru RET 54_

Technické údaje funkčních bloků použitých ochranných funkcí terminálu RET 543 verze Multi potřebných při návrhu modernizace systému chránění jsou uvedeny v příloze č.3 diplomové práce.

Všechna další důležitá technická data o terminálu transformátoru RET 54_ jsou dostupná v [10] nebo v další technické dokumentaci, která je volně přístupná na webových stránkách výrobce - firmy ABB.

6.1.2 Terminál vývodového pole ABB REF 542plus [13]

Terminál REF 542plus integruje do jednoho celku všechny sekundární funkce pro chránění polí rozveden vysokého napětí:

- Ochranné funkce
- Měřicí funkce
- Ovládací funkce
- Funkce monitorování a vlastní diagnostiky
- Komunikační funkce



Obr. 6.1.2 - čelní pohled na terminál vývodového pole REF 542plus

Díky velkému množství dostupných ochranných funkcí je přístroj vhodný pro všechny druhy aplikací. Pro představu uvedenu výpis pouze některých funkcí, výčet všech funkcí lze najít v [13]:

Proudové ochrany:

- Třífázový detektor zapínacího proudu
- Mžiková nadproudová
- Třífázová nesměrová nadproudová s nižším a vyšším stupněm seřiditelnosti
- Třífázová směrová nadproudová s nižším a vyšším stupněm seřiditelnosti
- Směrová zemní, nesměrová zemní a jiné

Napěťové ochrany:

- Mžiková přepět'ová
- Přepět'ová s nižším a vyšším stupněm seřiditelnosti
- Mžiková podpět'ová
- Podpět'ová s nižším a vyšším stupněm seřiditelnosti a jiné

Kabelové ochrany:

- Distanční ochrana V1, V2 a další

Diferenciální ochrana:

- Diferenciální ochrana pro motory a transformátory
- Stabilizovaná zemní ochrana pro transformátory

Tepelná ochrana pro kabely, motory a transformátory

Specifické ochrany motoru:

- Ochrana počtu startů
- Ochranná funkce při zablokovaném rotoru
- Ochrana rozběhu motoru a jiné

K dispozici jsou pak ještě ostatní typy ochrany se souvisejícími funkcemi.

Ochranné funkce kterými však bude terminál vybaven, závisí na objednané softwarové licenci. Tyto licence jsou Basic Low, Basic, Multi Low, Multi, Differential a Distance.

Technické údaje funkčních bloků použitých ochranných funkcí terminálu RET 542plus potřebných při návrhu modernizace systému ochrany jsou uvedeny v příloze č.4 diplomové práce.

Všechna další důležitá technická data o terminálu vývodového pole REF 542plus jsou dostupná v [13] nebo v další technické dokumentaci, která je opět volně přístupná na webových stránkách výrobce - firmy ABB.

6.2 Výpočet nastavení funkcí ochrany RET 543 pro transformátory T7, T8

Technická data chráněného objektu:

$S_{rT} = 10 \text{ MVA}$, $U_{rTHV} = 22 \text{ kV}$, $U_{rTLV} = 0,63 \text{ kV}$, $I_{rTHV} = 262 \text{ A}$, $I_{rTLV} = 916 \text{ A}$, zapojení $YNd11$,

- jmenovitý proud ochrany RET 543 $I_n = 5 \text{ A}$
- strana 22 kV:
vypínač: ABB VM1 24.12-25 $I_n = 1250 \text{ A}$, $U_n = 25 \text{ kV}$, $t_{vyp} = 60 \text{ ms}$,
PTP1 (pro $I > I_{>>}$): EJF TTR 61.12, převod 300/5/5 A , 10/15 VA , tř. 3-10P , n: <5-5,
kabelové vedení W7: 22-AXEKCY 3 x 1 x 240 mm² , $l = 40 \text{ m}$, $I_n = 496 \text{ A}$,
PTP2 (rozdílová ochrana): EJF TTR 61.11, převod 500/5 A , 30 VA , tř. 5P , n = 8,
- strana 6 kV:
PTP3 (rozdílová ochrana): EJF TTR 43.11, převod 1000/5 A , 30 VA , tř. 5P , n = 12,
kabelové vedení W14: 6-AYKCY 3 x 3 x 240 mm² , $l = 27 \text{ m}$, $I_n = 340 \text{ A}$,
PTP4 (pro $I >>>$): EJF TTR 43.11, 1000/5/5 A , 30/30 VA , tř. 0,5/5P , n = 5/5,
vypínač: ABB VM1 1.12 $I_n = 1250 \text{ A}$, $U_n = 25 \text{ kV}$, $t_{vyp} = 60 \text{ ms}$,

6.2.1 Výpočet I_{dov} kabelů W7 a W14 [12]

Při chránění kabelových vedení proti proudovému přetížení vycházíme z dovoleného proudu I_{dov} ve smyslu [13]. I_{dov} se tedy stanoví dle předpokladů uvedených v [13] následně:

kabelové vedení W7

Jednožilové kabely 22-AXEKCY 3 x 1 x 240 mm² uložené ve vzduchu, tzn. referenční způsob uložení „F“. Tyto jednožilové kabely jsou umístěny na perforovaných lávkách, seskupené volně, vždy tři kabely v trojúhelníku. Celkový počet třífázových obvodů na jedné lávce je dva a celkový počet lávek je tři. Z toho vyplývá součinitel k roven hodnotě 0,90. Výrobce udává proudovou zatížitelnost kabelu na vzduchu $I_n = 496 A$, pak:

$$I_{dov} = k \cdot I_n = 0,90 \cdot 496 = 446,4 A$$

kabelové vedení W14

Vícežilové kabely 6-AYKCY 3 x 3 x 240 mm² uložené ve vzduchu, tzn. referenční způsob uložení „E“. Kabely jsou opět umístěny na perforovaných lávkách, seskupené volně vedle sebe. Celkový počet kabelů na jedné lávce je tři a celkový počet lávek je také tři. Z toho vyplývá součinitel k roven hodnotě 0,95. Výrobce udává proudovou zatížitelnost kabelu na vzduchu $I_n = 340 A$, pak:

$$I_{dov} = 3 \cdot k \cdot I_n = 3 \cdot 0,95 \cdot 340 = 969 A$$

6.2.2 Výpočet nastavení nadproudových funkcí ochrany transformátoru RET 543

6.2.2.1 Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti NOC3High, 3I >>

strana 22 kV

- funkce signalizuje přetížení transformátoru 105% I_{rTHV}

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_{rTHV}}{p_p} = \frac{1,05 \cdot 262}{60} = 4,585 A$$

I_r nastavení na ochraně

k_b koeficient bezpečnosti: 1,05 pro ochrany zapojené pouze pro návěštění přetížení

p_p převod měřících transformátorů

Popudový proud funkce NOC3Inst nastavíme na **0,92 x I_n** ochrany, tzn. 4,6 A. Časové působení této funkce bude mít čas nastavený na $t = 12 s$.

6.2.2.2 Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti NOC3Low, 3I >

- funkce chrání transformátor proti přetížení (závislé spoždění-funkce)

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_{rTHV}}{k_p \cdot p_p} = \frac{1,1 \cdot 262}{0,95 \cdot 60} = 5,056 A$$

IDMT – dlouhodobě závislá charakteristika (Long time inverse) $k = 0,8$

I_r nastavení na ochraně

k_b koeficient bezpečnosti: 1,1

k_p přídržný poměr ochrany (u digitálních ochran ABB RET 54_ se volí hodnota 0,95)

p_p převod měřících transformátorů

Popudový proud funkce NOC3Low nastavíme na **1 x I_n** ochrany, tzn. 5 A. Pro časové spoždění ochrany jsem volil dle [1] dlouhodobě závislou charakteristiku (Long time inverse) IDMT s násobícím časovým faktorem $k = 0,8$.

6.2.2.3 Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, mžikový stupeň NOC3Inst, 3I >>>

- funkce vypíná zkratky, zálohuje rozdílovou ochranu a ochrany na straně sekundáru, nastavená na průchozí zkrat $I_{k2min F1} = 5,554 \text{ kA}$

$$I_r \leq \frac{I_{k2min F1}}{k_c \cdot p_p} = \frac{5554}{1,2 \cdot 60} = 77,139 \text{ A}$$

I_r nastavení na ochraně

$I_{k2min F1}$ minimální dvoufázový zkratový proud z R22 kV

k_c koeficient citlivosti – pro elektromechanické nadproudové ochrany se doporučuje použít nejméně 1,5, pro digitální ochrany postačí 1,2

p_p převod měřících transformátorů

Popudový proud funkce NOC3High nastavíme na **15,4 x I_n** ochrany, tzn. 77 A. Pro časové spoždění nastavíme pevný čas $t = 1,2 \text{ s}$, který vyhovuje i kontrole kabelů W7 a W14 na dovolené oteplení při zkratu a zároveň bude dodrženo selektivní odstupnění s nadřazenou nadproudovou ochranou v rozvaděčových skříních č.1 a č.2 v rozvodně R22 kV, chránící přívodní kabelové vedení W1 z HR 22 kV.

Kontrola kabelů W7 a W14 na dovolené oteplení při zkratu

Dle [1] se stanoví maximální doba pro odpojení kabelu při zkratu následně:

- pro kabel W7:

$$t \leq \left[\frac{k \cdot S}{I_{th F1 (1s)}} \right]^2 = \left[\frac{76 \cdot 240}{14294} \right]^2 = 1,63 \text{ s}$$

t doba trvání zkratu v sec

k koeficient pro výpočet oteplení při zkratu

$k = 76$ pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy menší než 300 mm^2 , při počáteční teplotě 70°C

S průřez vedení v mm^2

$I_{th F1}$ ekvivalentní oteplovací proud

- pro kabel W14:

$$t \leq \left[\frac{k \cdot S}{I_{th F1(1s)}} \right]^2 = \left[\frac{68 \cdot 720}{14294} \right]^2 = 11,73 \text{ s}$$

k koeficient pro výpočet oteplení při zkratu

$k = 68$ pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy větší než 300 mm^2 , při počáteční teplotě 70°C

6.2.2.4 Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti NOC3Low, 3I >

- funkce chrání transformátor proti přetížení (závislé spoždění-funkce)

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_{rTLV}}{k_p \cdot p_p} = \frac{1,1 \cdot 916}{0,95 \cdot 200} = 5,303 \text{ A}$$

IDMT – dlouhodobě závislá charakteristika (Long time inverse) $k = 0,8$

I_r nastavení na ochraně

k_b koeficient bezpečnosti: 1,1

k_p přídržný poměr ochrany (u digitálních ochran ABB RET 54_ se volí hodnota 0,95)

p_p převod měřících transformátorů

Popudový proud funkce NOC3Low nastavíme na **1,06 x I_n** ochrany, tzn. 5,3 A. Pro časové spoždění ochrany jsem volil dle [1] dlouhodobě závislou charakteristiku (Long time inverse) IDMT s násobícím časovým faktorem $k = 0,8$.

6.2.2.5 Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, mžikový stupeň NOC3Inst, 3I >>>

strana 6 kV

- funkce vypíná zkraty, zálohuje ochrany na straně přípojnice 6 kV, nastavená na hodnotu minimálního dvoufázového zkratu na přípojnici 6 kV $I_{k2min F2} = 7,251 \text{ kA}$

$$I_r \leq \frac{I_{k2min F2}}{k_c \cdot p_p} = \frac{7251}{1,2 \cdot 200} = 30,21 \text{ A}$$

I_r nastavení na ochraně

$I_{k2min F2}$ minimální dvoufázový zkratový proud na přípojnici 6 kV v R61

k_c koeficient citlivosti – pro elektromechanické nadproudové ochrany se doporučuje použít nejméně 1,5, pro digitální ochrany postačí 1,2

p_p převod měřících transformátorů

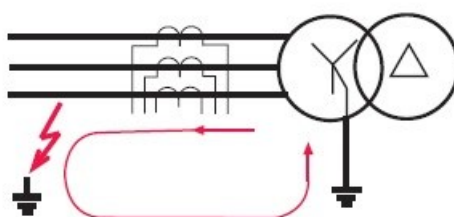
Nadproudovou funkci NOC3High nastavíme na **6 x I_n** ochrany, tzn. 30 A. Abychom zajistili selektivitu s podřízenými ochranami, nastavíme pro časové spoždění pevný čas $t = 1,1 \text{ s}$.

6.2.3 Nastavení diferenciální funkce ochrany transformátoru RET 543, Stabilizovaná $3\Delta I >$ a mžiková $3\Delta I \gg$ diferenciální ochrana transformátoru Diff6T [11]

6.2.3.1 Základní parametrizace diferenciální funkce

Eliminace nulové složky zemního proudu I_o

V případě, že je nulový bod vinutí transformátoru zapojeného do hvězdy uzemněn, budou všechny zemní poruchy v síti vnímány ochranou, jako rozdílový proud znázorněný na obr. 6.2.3a. Pro nastavení eliminace I_o se postupuje podle příručky [12] Diff6T function block manual (tab.1, str.28-30), kterou jsem neměl k dispozici, je však součástí dokumentace u dodání ochrany RET 54_.



Obr. 6.2.3a - znázornění zemního poruchového proudu I_o [11]

V další části parametrizace ochrany se nastavuje: způsob zapojení měřících transformátorů (CT connection = type I nebo type II), způsob zapojení strany vysokého a nízkého napětí (HV connection a LV connection), hodinový úhel (Clock number) a výše zmiňovaná eliminace nulové proudu I_o (I_o elimination). Způsoby zapojení měřících transformátorů opět najdeme v [12] (tab. 1, str. 28-30), proto jsem nastavení této funkce prozatím neuvedl. Jelikož je zapojení transformátoru $YNd11$, výpis nastavení pak bude vypadat takto:

CT connection = neuvedeno (k nastavení nutno mít [12])

HV connection = YN

LV connection = d

Clock number = 1

I_o elimination = neuvedeno (k nastavení nutno mít [12])

Korekce rozdílových měřících členů

V této části se nastavuje poměr „scaling“ mezi jmenovitým primárním proudem PTP a jmenovitým zatížením transformátoru. Tato parametrizace se provádí jak pro stranu vysokého, tak i nízkého napětí transformátoru:

- strana 22 kV:

$$scaling\ HV = \frac{I_{prim\ PTP2}}{I_{rTHV}} = \frac{500}{262} = 1,908$$

$I_{prim\ PTP}$ jmenovitý primární proud PTP

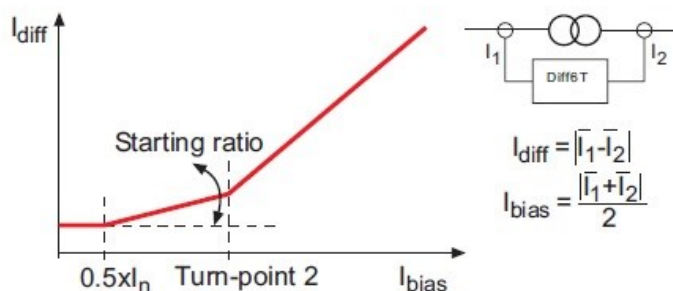
- strana 6 kV:

$$scaling\ LV = \frac{I_{prim\ PTP3}}{I_{rTLV}} = \frac{1000}{916} = 1,0917$$

6.2.3.2 Popudový poměr (starting ratio)

- sklon přímky 2. části vypínací charakteristiky

Za ideálních podmínek, a pokud nenastane porucha uvnitř chráněného objektu, bude rozdílový (diferenciální) proud nulový. Nicméně vzhledem k chybám PTP se v praxi rozdílový proud odchýlí od nulové hodnoty a s rostoucím zatížením transformátoru, bude zároveň růst i rozdílový proud. Nastavení popudového poměru ovlivňuje sklon vypínací charakteristiky mezi bodem zlomu č.1 (pevně nastaven výrobcem na $0,5 \times I_n$) a bodem zlomu č.2, jak je znázorněno na následujícím obr. 6.2.3b.



Obr. 6.2.3b - závislost nastavení popudového poměru na vypínací charakteristice [11]

Nastavení popudového poměru se vypočte jako součet přesností PTP na obou stranách transformátoru (5% + 5%), přesnosti hodnoty působení rozdílové funkce ochrany (4%) a požadované rezervy (zpravidla 5%). Výpočet nastavení popudového poměru (starting ratio) pak bude vypadat takto:

$$\begin{aligned} RET_startratio_s &= 5\% (HV - PTP2) \\ &+ 5\% (LV - PTP3) \\ &+ 4\% (ochrana) \\ &+ 5\% (rezerva) \\ &\underline{\hspace{1cm}} \\ &\Sigma 19\% \end{aligned}$$

$$RET_startratio_s = 19\%$$

6.2.3.3 Základní nastavení (basic setting)

– nejmenší poměr diferenciálního a jmenovitého proudu, který aktivuje vypnutí

Základní nastavení definuje minimální citlivost ochrany. V podstatě se zohledňuje proud naprázdno výkonového transformátoru, ale může být také toto nastavení použito k celkovému ovlivnění vypínací charakteristiky. Jmenovitý proud ztrát naprázdno výkonového transformátoru je při jmenovitém napětí menší než 1%. Ovšem pokud by se napájecí napětí transformátoru náhle zvýšilo v důsledku provozní poruchy, magnetizační proud se zvýší také. Obecně platí, že hustota magnetického toku transformátoru je při jmenovitém napětí poměrně vysoká a zvýšení napětí o několik procent způsobí, že magnetizační proud zvýší o desítky procent. To by mělo být zohledněno právě v základním nastavení. Závislost základního nastavení na vypínací charakteristiku je uvedena v obr. 6.2.3c.



Obr. 6.2.3c - závislost základního nastavení na vypínací charakteristiku [11]

Vezmeme-li v úvahu účinnost oblasti působení popudového poměru (starting ratio) začínající na $I_{bias} = 0,5 \times I_n$, a ztráty naprázdno transformátoru, dostaneme základní nastavení $= 0,5 \times \text{popudový poměr} + \Delta P_0'$, kde $\Delta P_0'$ představují ztráty naprázdno transformátoru při maximálním napětí. Zpravidla jsou $\Delta P_0' = 10\%$, v případě, že neznáme skutečnou hodnotu. Protože je v mém případě hodnota $\Delta P_0'$ neznámá, bude výpočet základního nastavení vypadat takto:

$$\text{RET_basicsetting} = 0,5 \times 19\% + 10\% = 19,5\%$$

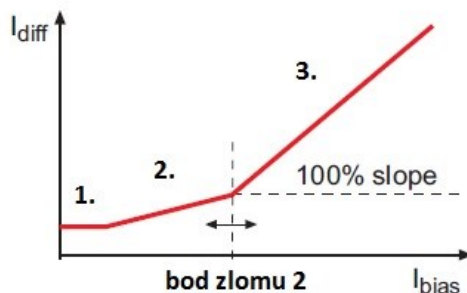
6.2.3.4 Nastavení bodu zlomu 2 (Turn-point 2)

- bod zlomu mezi 2. a 3. částí vypínací charakteristiky

Bod zlomu 2 (Turn-point 2) vymezuje vypínací charakteristiku, kde končí působení popudového poměru (starting ratio) a začíná 3. část vypínací charakteristiky. Bod se nastavuje po konstantní přímce v rozsahu $1,0 - 3,0 \times I_n$, viz. obr. 6.2.3d. Za tímto bodem je zvýšení rozdílového proudu I_{diff} rovno odpovídajícímu zvýšení stabilizačního proudu I_{bias} , vypočítaného ochranou. Nalezení nastavení bodu zlomu 2 diferenciální ochrany je vždy vyváženost mezi stabilitou a citlivostí ochrany. Čím nižší je nastavení, je ochrana stabilnější a méně citlivá. A naopak, čím vyšší je nastavení, tím citlivější a méně stabilní ochrana bude. Doporučení v aplikaci s výkonovým transformátorem, je nastavení bodu zlomu 2 v rozmezí $1,5 - 2,0 \times I_n$. S nastavením 1,5 bude ochrana stabilní

vůči poruchám mimo chráněnou zónu, přičemž s nastavením $2,0 \times I_n$, bude ochrana o něco více citlivá k poruchám v chráněné zóně. Pro nastavení jsem vybral:

`2ndturningpoint = 2,0`



Obr. 6.2.3d - závislost nastavení bodu zlomu 2 na vypínací charakteristiku [11]

6.2.3.5 Blokování 2. harmonickou ($I_{2f}/I_{1f} >$)

Výkonové transformátory jsou feromagnetické zařízení, které při zapínání vytváří magnetizační zapínací proud. Tento proud je vnímán ochranným diferenciálním relé jako rozdílový proud. Vzhledem k tomu, že transformátorová magnetizační impedance je nelineární, obsahuje druhý řád harmonických. Princip této ochranné funkce vychází z rozpoznání výskytu druhého řádu harmonických a tedy blokováním vybavení rozdílového relé s nízko nastaveným mžikovým stupněm $3\Delta I$ po dobu zapínání transformátoru. Doporučené nastavení v oblasti ochrany výkonových transformátorů je 15%, proto nastavení této funkce bude:

`2.harm.block = 15%`

společně s ponechaným doporučeným výchozím továrním nastavením „s odblokací“ („With deblock“). To pomocí speciálního algoritmu umožňuje potlačovat blokování při výskytu 2. harmonické, pokud algoritmus detekuje poruchu uvnitř chráněného objektu.

6.2.3.6 Nastavení vypínací hodnoty mžikového stupně $3\Delta I >>$

Doporučuje se použití spolu s nízkým nastavením, protože v případě závažné poruchy uvnitř chráněné zóny, bude funkce poskytovat rychlejší ochranu, než s vyšším nastavením a dále nebude funkce blokována při výskytu 2. harmonických, viz. text uvedený výše. V oblasti ochrany výkonových transformátorů je typické nastavení $6,0 - 10\% \times I_n$. Nastavení této funkce volím:

`Inst.setting = 6`

6.2.3.7 Blokování a odblokování 5. harmonickou ($I_{5f}/I_{1f} >$, $I_{5f}/I_{1f} >>$)

Tato funkce zůstane nenastavena z důvodu, že není známa magnetizační charakteristika transformátoru, nastavení tedy bude vypadat:

`5.harm.block = Not in use`

6.3 Výpočet nastavení ochrany REF 542plus pro kabelový vývod motoru [14]

Technická data chráněného objektu:

- jmenovitý proud ochrany REF 542plus $I_n = 5 \text{ A}$,

- 3-f asynchronní motor vn

typ: ZSE MEZ Drásov D1N4 355 X-4

$$P_{rM} = 250 \text{ kW}, U_{rM} = 6 \text{ kV}, I_{LR} / I_{rM} = 5,8, I_{rM} = 30,1 \text{ A}, \cos \phi_{rM} = 0,85, \eta_{rM} = 93,9\%,$$

Doba rozběhu motoru je 15 s, izolační třída je F a motor je konstruovaný na teplotu okolí 40 °C. Výrobce motoru firmou SIEMENS byl specifikován čas, po který je možno provozovat motor při U_{rM} se zablokovaným rotorem $t_{E(warm)} = 7 \text{ s}$, rovněž byl udán počet povolených startů a to tři za studena a dva za tepla.

- PTP 5

typ: EJP TSR 61.11, převod 30/5 A, 30 VA, tř. 10P, n = 5,

- kabelové vedení WM-2

$$6\text{-AYKCY } 3 \times 120 \text{ mm}^2, l = 135 \text{ m}, I_n = 214 \text{ A},$$

6.3.1 Výpočet I_{dov} a kontrola kabelu WM-2 na dovolené oteplení při zkratu [1] [12]

Vícežilové kabely 6-AYKCY 3 x 120 mm² uložené ve vzduchu, tzn. referenční způsob uložení „E“. Kabely jsou opět umístěny na perforovaných lávkách, seskupené volně vedle sebe. Celkový počet kabelů na jedné lávce je tři a celkový počet lávek je také tři. Z toho vyplývá součinitel k roven hodnotě 0,95. Výrobce je udávána proudová zatížitelnost kabelu na vzduchu $I_n = 214 \text{ A}$, tzn.:

$$I_{dov} = k \cdot I_n = 0,95 \cdot 214 = 203 \text{ A}$$

Kontrola kabelu na dovolené oteplení při zkratu trvajícím $T_k = 1 \text{ s}$:

$$t \leq \left[\frac{k \cdot S}{I_{th F2 (1s)}} \right]^2 = \left[\frac{76 \cdot 120}{22737} \right]^2 = 0,16 \text{ s}$$

Jelikož u předcházejícího výpočtu pro $T_k = 1 \text{ s}$ byl výsledek času 0,16 s, do kterého je nutné provést odpojení kabelu, aby nedošlo k jeho poškození průchodem zkratového proudu, provedu ještě kontrola kabelu na dovolené oteplení při zkratu trvajícím $T_k = 0,1 \text{ s}$:

$$t \leq \left[\frac{k \cdot S}{I_{th F2 (0,1s)}} \right]^2 = \left[\frac{76 \cdot 120}{24306} \right]^2 = 0,14 \text{ s}$$

$k = 76$ pro Al vodiče s izolací PVC, pro průřezy menší než 300 mm², při počáteční teplotě 70 °C

6.3.2 Výpočet nastavení jednotlivých funkcí ochrany REF 542plus

6.3.2.1 Ochrana rozběhu motoru [14]

Výpočet nastavení jmenovitého proudu motoru „nominal motor current (I_{Mn})“ vztažený k jmenovitému primárnímu proudu PTP, tj. k I_{nPTP} :

$$\text{nominal motor current } (I_{Mn}) = \frac{I_{rM}}{I_{nPTP}} = \frac{30,1}{30} = 1,003 \cdot I_n$$

Nastavení počáteční hodnoty (záběrného proudu) „start value (I_s)“ při spouštění motoru, jako násobek jmenovitého proudu motoru I_{Mn} a poměrného záběrného proudu I_{LR} / I_{rM} :

$$\text{start value } (I_s) = I_{LR} / I_{rM} \cdot I_{Mn} = 5,8 \cdot I_{Mn}$$

Nastavení počáteční hodnoty „motor start (I_{Ms})“, jako detekování záběrného proudu motoru při jeho rozběhu:

$$\text{motor start } (I_{Ms}) = 0,8 \cdot I_s$$

Doba rozběhu motoru je 15 s. U nastavení dovoleného času „Time“ pro funkci $I_s^2 \cdot ts$ tedy volím nastavení:

$$\text{Time} = 15 \text{ s} = 15\,000 \text{ ms}$$

to znamená, že jakmile je detekován nastavený rozběhový proud motoru (I_{Ms}) = $0,8 \cdot I_s$, ochrana začne monitorovat spouštění motoru v aktuálním čase a vypočítává tepelné namáhání během rozběhu motoru a porovnává ho s plochou obdelníka $I_s^2 \cdot ts$, jak je uvedeno v popisu ochranné funkce v kap. 1.4.2. Ochrana pak podle výpočtů vygeneruje vypínací signál za časový interval:

$$t = \frac{\left(\frac{I_{LR}}{I_{rM}}\right)^2 \cdot \text{Time}}{\left(\frac{I_{LR}}{I_{rM}} \cdot I_{Ms}\right)^2} = \frac{5,8^2 \cdot 15}{(5,8 \cdot 0,8)^2} = 23,4 \text{ s}$$

6.3.2.2 Ochranná funkce při zablokovaném rotoru [14]

$$\text{nominal motor current } (I_{Mn}) = \frac{I_{rM}}{I_{nPTP}} = \frac{30,1}{30} = 1,003 \cdot I_n$$

$$\text{start value } (I_s) = I_{LR} / I_{rM} \cdot I_{Mn} = 5,8 \cdot I_{Mn}$$

U nastavení časového zpoždění pro vypnutí „Time“ této ochranné funkce se volí hodnota, po kterou je možné provozovat motor při U_{rM} se zablokovaným rotorem $t_{E(warm)}$

„maximum stalling time hot ($t_{E(warm)}$)“. Nastavení časového intervalu tedy bude:

$$Time = 7\text{ s} = 7\,000\text{ ms}$$

to znamená, že ochrana vygeneruje vypínací signál, pokud se motor nezačne rozbíhávat a nezačne se chladit, za časový interval:

$$t = \frac{5,8^2 \cdot 7}{4,64^2} = 10,9\text{ s}$$

6.3.2.3 Tepelná ochrana proti přetížení [14] [1]

Jedná se o řešení tepelné ochrany proti přetížení za použití běžného tepelného modelu se třemi časovými konstantami. Princip tohoto tepelného modelu byl probrán v kap. 1.4.1. Zopakuji proto jen to nejdůležitější, z čeho budu vycházet u návrhu výpočtu nastavení této funkce. Jak je uvedeno v [1], ani tento model neřeší, stejně tak jako nejjednodušší jednosložkový model, zapnutí motoru z teplého stavu. Tento nedostatek se řeší za pomoci následujících předpokladů. Vychází se z toho, že izolační systémy vinutí motorů v odpovídající třídě F mají maximální teplotu 155 °C, avšak tyto motory jsou řešeny tak, že při zatížení podle štítkových hodnot, se dosahuje oteplení třídy izolace B s maximální teplotou 130 °C. Využívá se tedy rozdílu mezi jmenovitou teplotou pro třídu izolace B (130 °C) a maximální povolenou teplotou pro třídu izolace F (155 °C). Dále je zde ještě jeden předpoklad a to, že teplota v okolí motoru bude vždy nižší než 40 °C. V našich podmínkách uvažujeme max. teplotu okolí 30 °C. Jmenovitá teplota stroje se tak ještě sníží ze 130 °C na $\vartheta_{Mn} = 120$ °C. Tím se rozdíl teplot z jmenovité po maximální pro třídu izolace F zvýší na 35 °C, což už pro jeden teplý start dostačuje. To vše je zohledněno i v následujících výpočtech nastavení ochrany.

Stanovení základních parametrů

$$I_{Mn} = \frac{I_{rM}}{I_{nPTP}} = \frac{30,1}{30} = 1,003$$

Vinutí motoru má třídu izolace F. Motor je konstruovaný na teplotu 40°C, proto nastavení teploty prostředí T_{env} „Environment temperature (T_{env})“:

$$T_{env} = \vartheta_u = 40\text{ °C}$$

Nárůst teploty od počáteční teploty prostředí pro třídu izolace F $\vartheta_u = 40$ °C po teplotu při jmenovitém zatížení pro třídu izolace B, tzn. $\vartheta_{Mn} = 120$ °C je 80 °C ($\vartheta_{Mn} = 40 + 80 = 120$ °C) viz. tab 6.3.2. Nastavení jmenovité teploty motoru (přípustné provozní teploty) „Nominal motor temperature / permissible operating temperature (T_{Mn})“ bude:

$$T_{Mn} = \vartheta_{Mn} = 120\text{ °C}$$

Třída izolace / max. teplota ϑ_t [°C]	A/105	E/120	B/130	F/155	H/180
Teplota při jmenovitém zatížení ϑ_{Mn} [°C]	95	110	120	130	166
Teplota na konci maximální přípustné doby blokování motoru [°C]	160	175	185	210	235

Tab. 6.3.2 - třídy izolací motorů [15]

Stanovení maximální teploty pro třídu izolace F vychází z tab. 6.3.2 a je 155 °C. Na ochraně se tedy teplota pro vypnutí „Trip temperature (T_{trip})“ nastaví na:

$$T_{trip} = \vartheta_t = 155 \text{ °C}$$

Nastavení teploty výstrahy T_{warn} „Temperature for warning (T_{warn})“, ta signalizuje, že motor dosáhl 120% obsahu tepelné kapacity. Celý obsah tepelné kapacity je vždy určen rozdílem teplot, jmenovité teploty motoru (tzn. pro mé řešení jmenovitého zatížení pro třídu izolace B, $\vartheta_{Mn} = 120 \text{ °C}$) a teploty prostředí $\vartheta_u = 40 \text{ °C}$:

$$T_{warn} = [120\% \cdot (\vartheta_{Mn} - \vartheta_u)] + \vartheta_u = [1,2 \cdot (120 - 40)] + 40 = 136 \text{ °C}$$

Za účelem funkčního testování, je k dispozici další teplotní nastavení T_{rst} pro resetovací funkci. Pokud je na vstupu funkčního bloku resetovací signál, teplota motoru se znovu nastaví na tuto definovanou hodnotu T_{rst} . Nastavení hodnoty teploty po resetování funkce T_{rst} „Temperature after resetting the function (T_{rst})“ se volí:

- a) Pro kontrolu vypínací charakteristiky bez předchozího zatížení je hodnota stejná, jako teplota prostředí T_{env} , tj. 40 °C :

$$\text{Set 1: } T_{rst} = 40 \text{ °C}$$

- b) Pro kontrolu vypínací charakteristiky se 100% předchozím zatížením, musí být hodnota rovna nastavení jmenovité teploty motoru T_{Mn} , tj. 120 °C :

$$\text{Set 2: } T_{rst} = 120 \text{ °C}$$

Chování během zapnutí a vypnutí

Pro výpočet T_{ini} , počáteční teploty tepelné kapacity motoru po připojení napájecího napětí „Initial temperature (T_{ini})“, doporučuje [14] nastavení s hodnotou 90% obsahu tepelné kapacity (tzn. 90% z rozdílu teplot při jmenovitém zatížení pro třídu izolace B a teploty prostředí):

$$T_{ini} = \vartheta_u + 90\% \cdot (\vartheta_{Mn} - \vartheta_u) = 40 + 0,9 \cdot (120 - 40) = 112 \text{ °C}$$

Pro další nastavení parametrů, je nutné výpočítat konstantu k udávající přetížení „Overload constant“, ta nabývá hodnot v rozmezí 1 – 1,2. V mém případě bude:

$$k = \sqrt{\frac{\vartheta_t - \vartheta_u}{\vartheta_{Mn} - \vartheta_u}} = \sqrt{\frac{155 - 40}{120 - 40}} = 1,199 \doteq 1,2$$

Nastavení časových konstant:

1. Časová konstanta „ $TC_{Overheat}$ „ (provoz motoru při přetížení nad 2. násobkem I_{Mn}) :

$$\tau = \frac{t_E}{\ln \frac{(I_A/I_{Mn})^2 - 1}{(I_A/I_{Mn})^2 - k^2}} = \frac{t_E}{\ln \frac{(I_{LR}/I_{rM})^2 - 1}{(I_{LR}/I_{rM})^2 - k^2}} = \frac{7}{\ln \frac{(5,8)^2 - 1}{(5,8)^2 - 1,2^2}} = 516 \text{ s}$$

$$TC_{Overheat} = 516 \text{ s}$$

2. Časová oteplovací konstanta „ TC_{Normal} „ pro motor, který byl před vznikem přetížení zatěžován jmenovitým proudem:

Jelikož časová oteplovací konstanta není známá a je v tomto případě bezpečné očekávat včasné vypnutí, dovoluje se pro stanovení této časové konstanty použít stejnou hodnotu, jako je u časové konstanty „ $TC_{Overheat}$ “ , tedy [14]:

$$TC_{Normal} = TC_{Overheat} = 516 \text{ s}$$

3. Časová konstanta pro ochlazení motoru „ TC_{Off} „ se dle [14] uvažuje, jako trojnásobek hodnoty časové oteplovací konstanty TC_{Normal} :

$$TC_{Off} = 3 \cdot TC_{Normal} = 3 \cdot \tau = 3 \cdot 516 = 1548 \text{ s}$$

6.3.2.4 Ochrana počtu startů motorů [14]

Počet startů motoru za studena a za tepla není v katalogových údajích motoru uvedený, výrobce těchto motorů, dnes již firma SIEMENS sdělila, že počet startů u těchto typů motorů jsou tři starty za studena a dva starty za tepla. Nastavení na ochraně proto bude vypadat takto:

$$\text{Max. num. of warm starts } (N_{ws}) = 2$$

$$\text{Max. num. of cold starts } (N_{cs}) = 3$$

V případě, že spuštění motoru bylo úspěšné, až po vyčerpání všech povolených pokusů, bude počítací počet startů po uplynutí doby TC_{Off} nastaven zpět na hodnotu o minus jedna. Pokud by bylo dosaženo počtu povolených startů bez úspěšného rozběhu motoru, nastupuje na řadu ochranná funkce „ START output “, která motoru umožní začít znovu, až po uplynutí doby TC_{Off} . Podle [14] se pro hodnotu „ Reset time (t_{rst}) “ uvažuje hodnota 60% z časové konstanty pro ochlazení motoru „ TC_{Off} “ :

$$t_{rst} = 60\% \cdot TC_{Off} = 0,6 \cdot 1548 = 929 \text{ s}$$

Prahová hodnota teploty pro teplý start T_{ws} „Warm start temp. threshold“ (T_{ws}) “ se uvažuje při dosažení 90% tepelné kapacity motoru [14]:

$$T_{ws} = \vartheta_u + 90\% \cdot (\vartheta_{Mn} - \vartheta_u) = 40 + 0,9 \cdot (120 - 40) = 112 \text{ } ^\circ\text{C}$$

6.3.2.5 Nadproudová funkce ochrany [1] [9]

Nastavení mžikové nadproudové funkce ochrany I>>> na působení při zkratu

Předpoklad, který musí nastavení zkratové ochrany splnit, je zkratové nastavení ochrany vyšší než je rozběhový proud motoru [1]. Podle [9] se popudová hodnota ochrany stanoví:

$$I_r \geq \frac{k_b \cdot I_{roz b}}{p_p} = \frac{k_b \cdot I_{LR}}{p_p} = \frac{k_b \cdot \left(I_{rM} \cdot \frac{I_{LR}}{I_{rM}} \right)}{p_p} = \frac{1,8 \cdot 174,6}{6} = 52,38 \text{ A}$$

k_b koeficient bezpečnosti, který se volí pro asynchronní motory 1,5 až 2 [9]
volím $k_b = 1,8 \rightarrow$ tím zároveň i vyhovím doporučení uvedeném v kap. 1.4.4, aby bylo nastavení zkratové ochrany nastaveno alespoň na $10 \times I_n$ motoru [1]

$I_{roz b}$ rozběhový proud motoru

p_p převod měřících transformátorů

$$Time = 0,015 \text{ s}$$

Popudový proud mžikové nadproudové funkce I>>> nastavíme na **10,5 x I_n** ochrany, tzn. 52,5 A. Nastavení nejnižšího možného času působení $t = 0,015 \text{ s}$ vychází z kontroly kabelu WM-2 na dovolené oteplení při zkratu v kap. 6.3.1. Pokud se na tomto motorovém vývodu vyskytne zkrat na kabelu nebo na motoru, mělo by být kabelové vedení odpojeno vypínačem v čase $t \leq 0,14 \text{ s}$. Pokud ochrana při zkratu na vývodu mžikově zareaguje za $t_{ochr} = 0,015 \text{ s}$, dá se předpokládat, že i při vypínání pomocí původního máloolejového vypínače, bude doba $t \leq 0,14 \text{ s}$ dodržena s časovou rezervou 0,045 s:

$$t_{vyp. \text{ zkratu}} = t_{ochr} + t_{vyp} = 0,015 + 0,080 = 0,095 \text{ s}$$

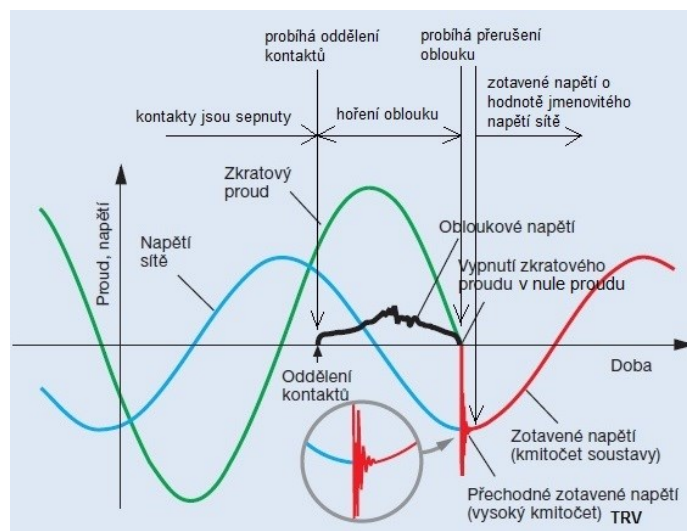
7. Problematika spínacích přepětí [2] [15]

V této kapitole se budu v krátkosti věnovat problematice, stále častěji objevujícím se spínacím přepětím, vznikajícím u vypínání malých, středních a zkratových proudů induktivního charakteru vakuovými vypínači. Tato spínací přepětí v mém případě ohrožují izolaci vinutí starších typů 6 kV motorů, které na ÚK používáme. Motory ovšem na tato přepětí nejsou konstruována. V odborných kruzích po celém světě jsou tato spínací přepětí spjata s pojmem přechodného zotaveného napětí (nebo-li TRV z anglického výrazu „Transient Recovery Voltage“), což bude vysvětleno dále v textu. Cílem kapitoly pak je shrnutí získaných informací, zhodnotit výsledky měření na R61 a uvést možné způsoby, jak by se dala přepětí v budoucnu ošetřit, aby se předešlo dalším poškozením motorů vlivem vzniku těchto spínacích přepětí.

7.1 Vznik přechodného spínacího přepětí „TRV“

7.1.1 „TRV“ při vypínání zkratových proudů induktivního charakteru

Při vzniku zkratu dojde na popud prvku detekujícího zkratový proud k rozepnutí kontaktů vypínače, které však sami o sobě procházející zkratový proud ihned nepřeruší. Mezi oddalujícími se kontakty vypínače totiž vznikne elektrický oblouk a jím se proud trvale uzavírá. Mezi kontakty dochází k přechodnému ději. Úspěšné rozepnutí obvodu a vypnutí proudu závisí na tom, zda se podaří přerušit elektrický oblouk ihned v prvním průchodu zkratového proudu přirozenou nulou. Přerušeni zkratového proudu se nejlépe dosáhne právě při nulové hodnotě protékajícího proudu, tj. ve střídavých sítích dvakrát za periodu. Průběh proudu a napětí při vypínání zkratového proudu ve vakuu je zřejmý z Obr. 7.1.1. Zkratový proud, jak již bylo uvedeno, má induktivní charakter, proto při průchodu proudu nulou je napětí sítě (zdroje) maximální.



Obr. 7.1.1 - průběh proudu a napětí při jednofázovém vypínání ve vakuu

Jak už ze samotného pojmu přechodné zotavené napětí „TRV“ vyplývá a je dobře vidět i z Obr. 7.1.1, „TRV“ je počáteční částí zotaveného napětí u_{zot} a jeho význam bude popsán dále v textu. Zotavené napětí u_{zot} je střídavým napětím síťové frekvence (napětím zdroje), které se objevuje na kontaktech vypínače už v počátcích přechodného děje během přerušování

elektrického oblouku těmito kontakty. Zotavené napětí síťového kmitočtu se bude v prvních okamžicích během vypínání měnit z nuly na harmonické napětí síťové frekvence s oscilacemi, jejichž vysoké frekvence budou odpovídat vlastní frekvenci obvodu ω_0 . Z tohoto je tedy vzat pojem pro počáteční fázi zotaveného napětí – přechodné zotavené napětí „TRV“, které disponuje vysokou strmostí nárůstu a vysokým kmitočtem oscilací.

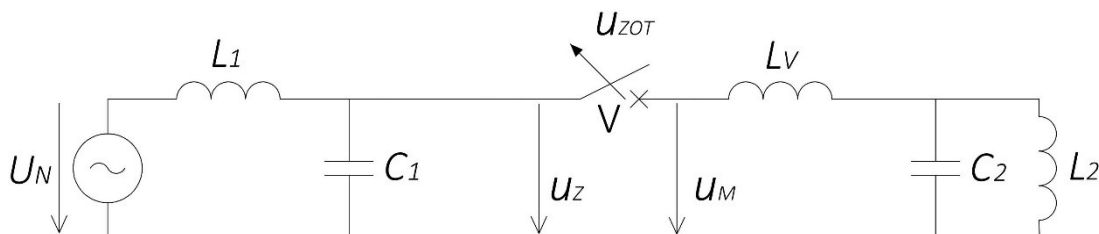
V případech, kdy je vlastní frekvence ω_0 vysoká (L a C obvodu je malé), vzrůstá „TRV“ při přerušování oblouku na rozpojených kontaktech vypínače velkou strmostí. Jestliže je nárůst „TRV“ rychlejší než zotavující se elektrická pevnost vypínací dráhy mezi kontakty vypínače, může v některých případech dojít i k opětovnému zapálení oblouku, který může být opět přerušen až při následném průchodu proudu nulou v další půlperiodě, kde díky větší vzdálenosti kontaktů vypínače je elektrická pevnost vypínací dráhy vypínače vyšší. Nárůst elektrické pevnosti vypínací dráhy, pak závisí zejména na konstrukci vypínače [2]. Vakuového vypínače VM1 díky jeho konstrukci a vysoké el. pevnosti vákua, by se tento problém opětovného zápalu el. oblouku však týkat neměl. Celý tento pochod se uplatňuje i u vypínání malých proudů induktivního charakteru v další kapitole.

Díky tomu, že jsou vypínače konstruovány, aby spolehlivě vypínaly zkratové proudy při jejich průchodem přirozenou nulou, vede tato skutečnost k tomu, že naopak menší hodnoty induktivních proudů jsou výkonovými vypínači odtrhávány dříve v tzv. vnucené nule. A díky tomuto jevu nastává rozdíl mezi vypínáním induktivních zkratových proudů a vypínáním malých induktivních proudů, jenž je popsáno dále.

7.1.2 „TRV“ při vypínání malých induktivních proudů výkonovými vypínači

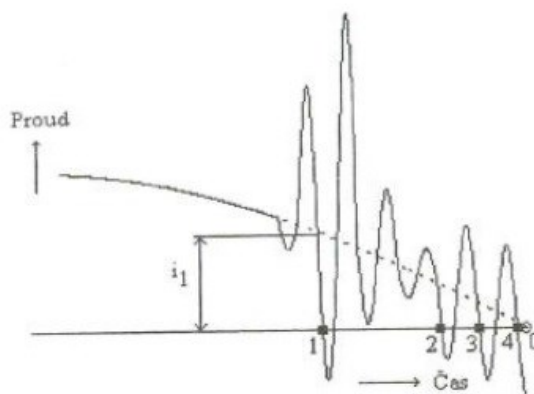
Malé induktivní proudy jsou zlomky jmenovitého proudu a jsou oproti zkratovým proudům vypínány výkonovými vypínači obecně v tzv. vnucené nule viz. Obr. 7.1.2b. a to znamená, že při průchodu proudu vnucenou nulou bude napětí ještě před svým maximem. Z tohoto důvodu můžou vznikající „TRV“ dosahovat značných hodnot, než je tomu u vypínání zkratových proudů. Tato přepětí se pak můžou nepříznivě projevit na vypínaných induktivních zátěžích, což potvrzují i mnou prostudované prezentační materiály [15], jejichž poznatků a zkušeností s „TRV“ jsem také využil při zpracovávání diplomové práce.

Průchod proudu vnucenou nulou předbíhající přirozenou nulou při vypínání malých induktivních proudů je způsoben oscilacemi, které jsou vyvolány chováním elektrického oblouku malých proudů ve výkonových vypínačích obecně. Hoření oblouku je pak velmi nestabilní a má za následek vznik přechodného děje zobrazeného na Obr. 7.1.2b [2]. Celou analogii vypínání malých induktivních proudů si vysvětlíme pomocí náhradního obvodu na Obr. 7.1.2a.



Obr. 7.1.2a - znázornění obvodu při vypínání malých a středních induktivních proudů

Obvod představuje náhradní schéma připojení motoru k síti. Síť je zde vyjádřena zdrojem střídavého napětí U_N , indukčností L_1 a kapacitou C_1 , motor spínaný vypínačem V je nahrazen indukčností L_2 a kapacitou C_2 . L_V vyjadřuje indukčnost vedení mezi vypínačem a motorem. Protože jsou tyto indukčnosti malé, je frekvence vlastních oscilací obvodu složeného z kapacit C_1 , C_2 a indukčnosti L_V řádově jednotky až desítky kHz [2].



Obr. 7.1.2b – nestabilní hoření oblouku způsobené oscilacemi proudu s nepravdělnou amplitudou [2]

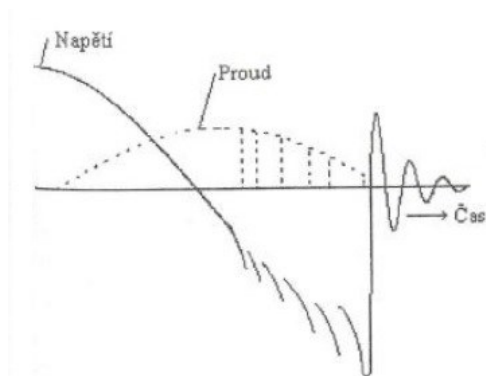
Přechodné děje způsobené nestabilním hořením oblouku vyvolají vznik oscilací, které s nepravdělnou amplitudou superponují na proud síťové frekvence viz. Obr. 7.1.2b. Díky těmto oscilacím nabývá proud nulové hodnoty už v bodech 1 až 4, tedy před přirozenou nulou v bodě č.0. V závislosti na strmosti nárůstu „TRV“ a na vzrůstu elektrické pevnosti vypínací dráhy mezi kontakty vypínače při přerušování el. oblouku může nebo nemusí v některém z těchto bodů dojít ke konečnému přerušení proudu. Předpokládejme, že k přerušení dojde v bodě 1. Proud indukčnostmi L_1 a L_2 je dán okamžitou velikostí i_1 proudu síťové frekvence. Obě indukčnosti se budou bránit přerušení protékajícího proudu vzrůstem napětí, a tím se vyvolá přechodný děj přeměny magnetické energie indukčností L_1 , L_2 na energii elektrickou kapacit C_1 , C_2 a naopak. Při zanedbání ztrát energie na odporu můžeme z rovností magnetické a elektrické energie odvodit tyto vztahy pro maximální amplitudu „TRV“ a frekvenci jeho oscilací na kontaktech vypínače na straně sítě (zdroje) u_Z a na straně motoru u_M [2] [15] :

$$u_Z = i_1 \cdot \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_1 \cdot C_1}} \rightarrow f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_1 \cdot C_1}}$$

$$u_M = i_1 \cdot \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{L_2 \cdot C_2}} \rightarrow f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_2 \cdot C_2}}$$

Průběh napětí proti zemi na kontaktech vypínače při přerušení proudu, resp. el. oblouku se na straně sítě a straně motoru liší. Na straně motoru je amplituda vlastních oscilací větší, neboť přechodný děj je vyvolán změnou napětí z maximální hodnoty na nulu, zatímco na straně sítě je změna napětí vyvolávající přechodný děj dána jenom malým nárůstem napětí, který je způsobený odlehčením sítě od zatížení motorem [2].

Může ovšem nastat i případ, že „TRV“ na kontaktech vypínače má díky vysoké frekvenci vlastních oscilací velkou strmost, a protože kontakty vypínače nejsou po prvním průchodu nulou v bodě 1 dostatečně od sebe vzdáleny, vypínací dráha se může prorazit a může dojít k opětovnému zápalu oblouku, k dalšímu průchodu nulou a děj se opakuje, dokud elektrická pevnost dráhy mezi kontakty nedosáhne dostatečné velikosti. Na průběhu proudu a napětí na kontaktech vypínače na straně motoru se tento opakovaný děj projeví charakteristickým pilovitým průběhem viz. Obr. 7.1.2c [2].



Obr. 7.1.2c - charakteristický pilovitý průběh napětí na kontaktech na straně motoru při znovuzapálení oblouku

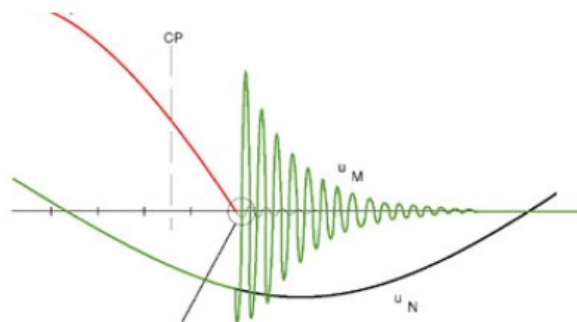
Shrnutím uvedených poznatků se dá říci, že při rychlém a úspěšném vypnutí malého induktivního proudu výkonovým vypínačem, už např. v bodě 1 na obr. 7.1.2b, dojde k vzniku přepětí „TRV“ na straně sítě i motoru o špičkových hodnotách daných max. amplitudou napětí u_M a u_Z . Na straně zátěže pak přechodný děj po přerušení induktivního proudu ještě doznívá a to je způsobeno energií akumulovanou v indukčnostech obvodu, která se po úspěšném přerušení proudu vybíjí přes kapacitu tohoto obvodu, jak je znázorněno na průběhu napětí na Obr. 7.1.2c.

7.1.3 „TRV“ při vypínání středních induktivních proudů vakuovými vypínači

Vznikající „TRV“ u vypínání středních induktivních proudů (I_n nebo $I > I_n$) vakuovými vypínači, ohrožují svými vysokými hodnotami hlavně odpojovaná induktivní zařízení (v mém případě tedy 6 kV motory). Přechodné děje se vysvětlují na stejném principu, jako u modelu náhradního schéma na Obr. 7.1.2 u vypínání malých induktivních proudů. Je ovšem třeba brát zřetel na následující odlišnosti oproti problematice vypínání malých induktivních proudů:

- Při povelu vypnutí, vypínač provádí rozpojení kontaktů, tím dochází ke vzniku el. oblouku, který udržuje do doby těsně před průchodem vypínaného proudu přirozenou nulou, kde následuje tzv. useknutí vypínaného proudu vypínačem (useknutí proudu při $I_n = 2 - 3$ A). V tom je hlavní rozdíl oproti vypínání malých induktivních proudů, kde dochází vlivem nestabilního hoření oblouku k oscilacím vypínaného proudu a tím pak ke dřívějšímu průchodu vypínaného proudu nulou.
- Díky konstrukci vakuového vypínače a vysoké el. pevnosti vakua je také malá pravděpodobnost znovuzapálení el. oblouku po useknutí proudu před průchodem přirozenou nulou.

Jelikož je vypínáný střední induktivní proud tzv. useknut před jeho průchodem přirozenou nulou, nastává podobná situace s využitím obdobného popisu přechodných dějů, jaké bylo u vypínání malých induktivních proudů. Přechodný děj k němuž dochází při vypínání středních induktivních proudů je znázorněn na následujícím Obr. 7.1.3 [15].



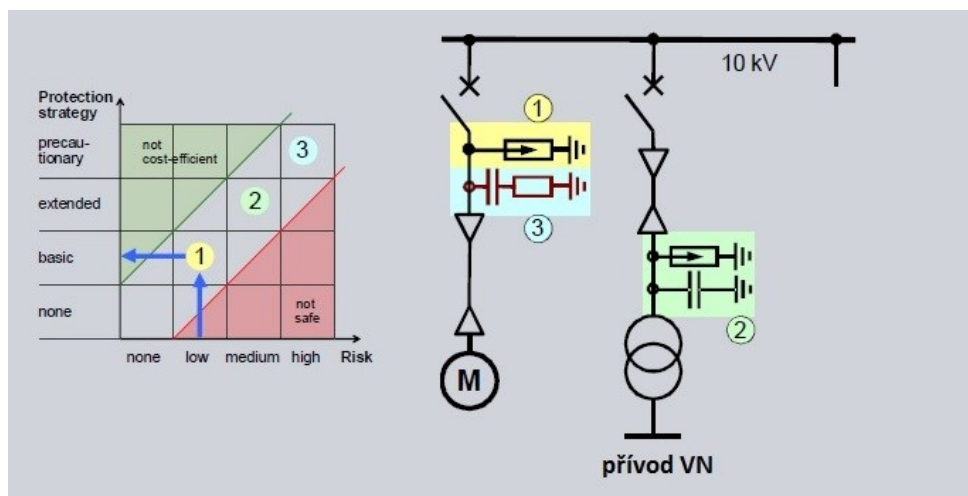
Obr. 7.1.3 – přechodný děj při vypínání induktivního proudu motoru [15]

Po úspěšném vypnutí tzv. useknutím induktivního proudu (při $I_n 2 - 3 A$), jak je vyobrazeno na Obr. 7.1.3, dojde na straně zátěže (motoru) k přechodnému ději, tzn. k vzniku přepětí „TRV“ o oscilacích podle parametrů obvodu L_2 a C_2 a o špičkové hodnotě danou max. amplitudou napětí u_M . Přechodný děj i po průchodu proudu nulou stále doznívá, což je způsobeno energií akumulovanou v indukčnosti L_2 , která se přeměňuje na energii elektrickou kapacity C_2 a naopak, až dokud se energie úplně nevybije.

Je zřejmé, že právě vyšší hodnoty napětí u_M na kontaktech vypínače ze strany motoru, mohou škodlivě působit na odepínané vn motory. V aplikacích, kde jsou ještě používány motory staršího data a nemají tak odolnou izolaci vinutí, jako je v našem případě, si myslím, že může právě těmito přepětími docházet k postupné degradaci izolace vinutí motoru, což může v nejhorším případě skončit i poškozením motoru následkem mezizávitového zkratu ve vinutí motoru.

7.2 Doporučené způsoby ošetření spínacích přepětí [15]

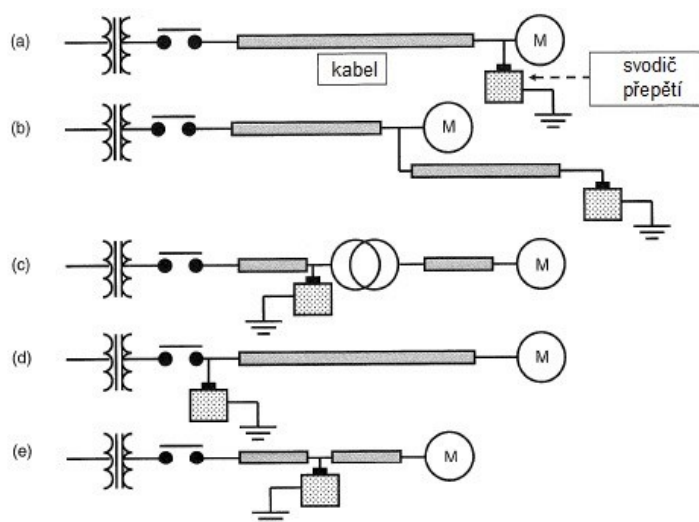
Z předešlého textu vyplývá, že elektrická zařízení je nutné před „TRV“ chránit. Způsobů omezení přepětí vznikajícího na straně zátěže při vypínání induktivních proudů vakuovými vypínači je hned několik. Jednotlivé způsoby řešení se od sebe liší a to podle druhu zařízení, které mají chránit a podle jeho umístění v síti. Pro aplikaci chránění vn motorů doporučuje firma SIEMENS v [15], použití následující strategie chránění pro vn motory:



Obr. 7.2a - nejběžnější strategie chránění pro vn motory [15]

- Způsob č.1: používá se u motorů s $I_{roz} < 600 A$ umístění svodiče přepětí na motorovém vývodu.
- Způsob č.2: používá se při přepětí z napájecí sítě umístěním přepětového kondenzátoru + svodiče přepětí ve vývodovém poli.
- Způsob č.3: používá se u starých motorů s častou frekvencí spouštění nebo pokud motor nemá izolaci podle IEC 60034-15 umístěním RC obvodu na motorovém vývodu.

Další možná schémata pro umístění svodičů přepětí v obvodu [15]:



Obr. 7.2b – schémata možných umístění svodičů přepětí v obvodu [15]

Firma ABB dále v [15] uvádí důležité vlastnosti přepět'ových ochran vhodných pro instalace k induktivním zátěžím:

Svodič přepětí:

- omezuje maximální hodnotu přepětí,
- musí být přizpůsoben očekávané „ bezpečné “ úrovni napětí a předpokládanému vybíjení energie,
- nelze zabránit rychlým přechodným dějům, které způsobují nerovnoměrné rozložení napětí ve vinutí.



Obr. 7.2c - svodič přepětí [15]

RC členy:

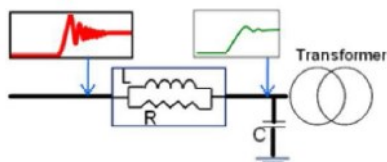
- snižují du/dt zotaveného napětí a špičkové hodnoty,
- musí být přizpůsobeny k síti pomocí numerických výpočtů v programu EMTP s cílem vyhnout se rezonančním oscilacím.



Obr. 7.2d - RC člen [15]

Filtrační tlumivky:

- omezují nárůst napětí pro nízká proudová zatížení (jak znázorněno na Obr. 7.2, použití hlavně u transformátorů)



Obr. 7.2e - filtrační tlumivka

7.3 Měření spínacích přepětí na rozvodně R22 kV, rozváděči R61

7.3.1 Stručný popis měření

Jak bylo sděleno hned v úvodu diplomové práce, na základě poškození dvou motorů I.linky spínacími přepětími, byly na dotčené motorové vývody na místo vakuových vypínačů zpětně nasazeny původní máloolejové vypínače. Toto prozatimní řešení určitě zamezení výskytu těchto spínacích přepětí pomohlo. Dá se tak usuzovat z faktu, že od té doby k již žádnému takovému poškození vn motoru nedošlo a také z výsledků měření spínacích přepětí na R61. V minulém roce proběhla v rámci investiční akce „montáž dvou nových vývěj na I.lince a II.lince vodního prádla“ instalace dvou kusů třífázových RC členů ($R=3 \times 30 \text{ M}\Omega$, $C=3 \times 0,5 \text{ }\mu\text{F}$) na motorových vývodech

pro tyto vývěvy (rozdávěč R61 - pole č.16 a pole č.40). Tyto RC členy jsou na motorových vývodech nainstalovány podle způsobu č.3 znázorněném na Obr. 7.2a. Abych si ověřil funkčnost RC členu a zjistil rozdíly ve vzniku spínacích přepětí mezi vypínáním vakuovými a máloolejovými vypínači, rozhodl jsem se v rámci svých omezených možností k uskutečnění srovnávacího měření přechodných dějů při odepínání těchto vn motorů od sítě. Při vypínání byly motory vždy ve stavu chodu pod běžným jmenovitým zatížením o hodnotách $I_n = 11,8 - 14,9 \text{ A}$ při $U_n = 6,29 \text{ kV}$.

Meření bylo provedeno přenosným analyzátozem sítě BK-ELCOM v provedení ENA330, který je kompaktním analyzátozem kvality elektřiny bez displeje. Přístroj je vybaven čtyřmi napěťovými a proudovými vstupy. Proudů se měří nepřímo použitím proudových kleští s železným jádrem nebo flexibilních Rogowského cívek – AmpFLEX [17]. Veškeré technické údaje k tomuto analyzátoru je možno najít v [17].

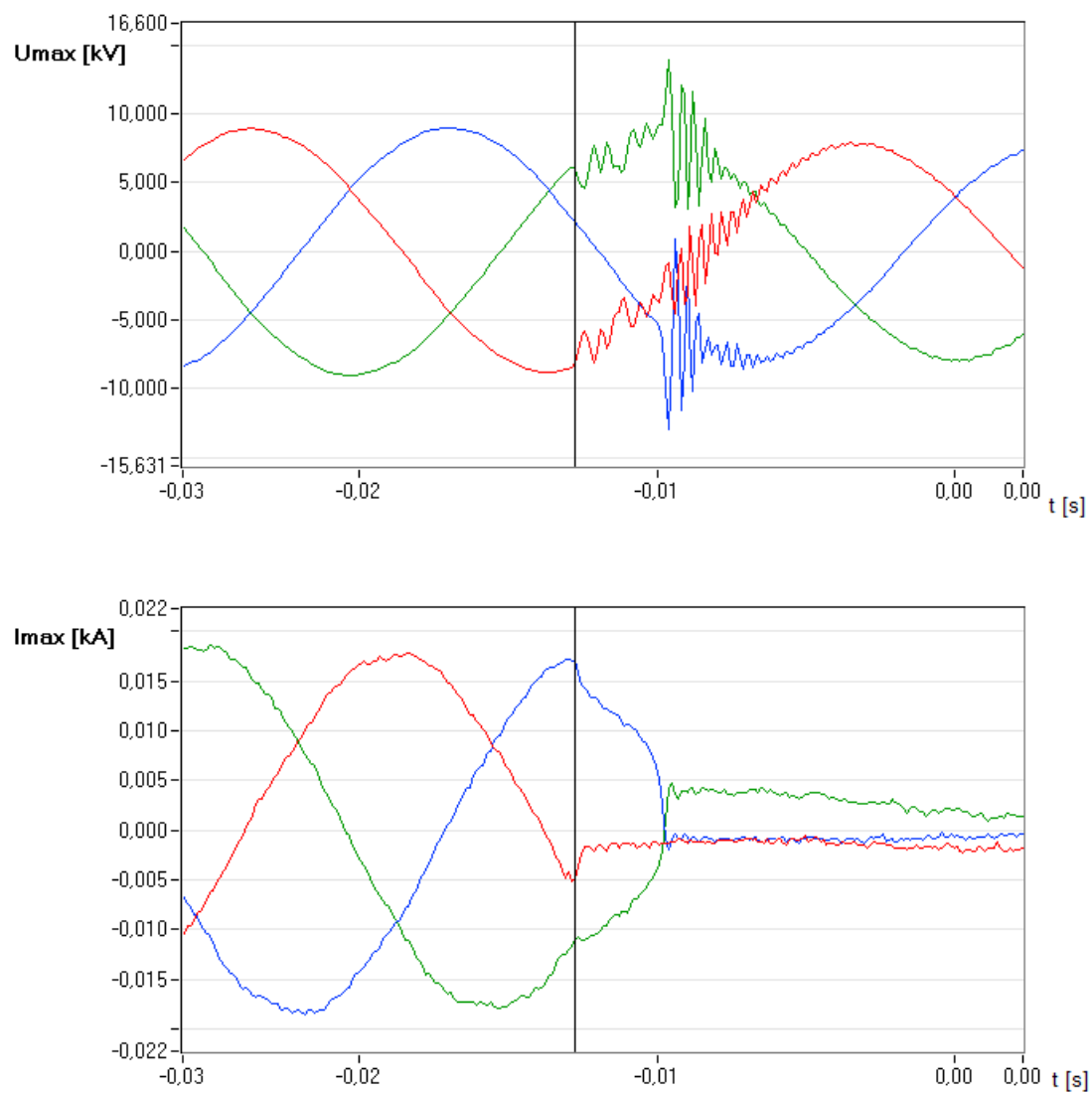


Obr. 7.3.1 – analyzátor sítě BK-ELCOM typ ENA330 [17]

7.3.2 Výsledky ze srovnávacího měření

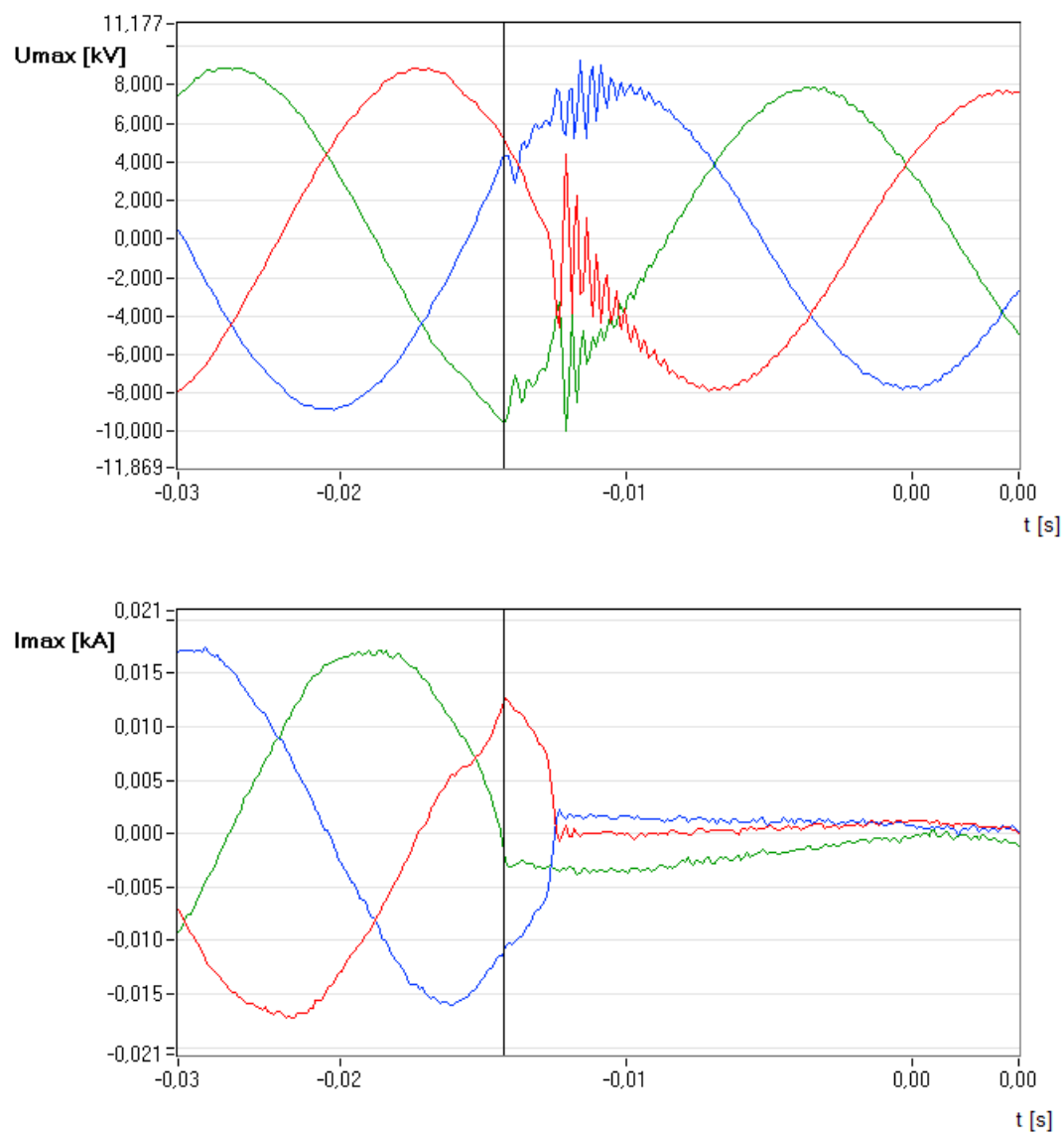
Na níže uvedených grafech budou znázorněny maximální hodnoty průběhů napětí a proudů během procesu vypínání motoru MEZ 1N4 355 X-4 a L-4. Kurzory v jednotlivých grafech znázorňují počátek vypínacího procesu. Hodnoty napětí a proudů jsou brány ze strany sítě (zdroje) při odepínání motoru dle výběru výzbroje vývodového pole:

- **Motor 1N4 355 L-4 (firemní ozn. 1289.3), vakuový vypínač VM1, bez RC členu**



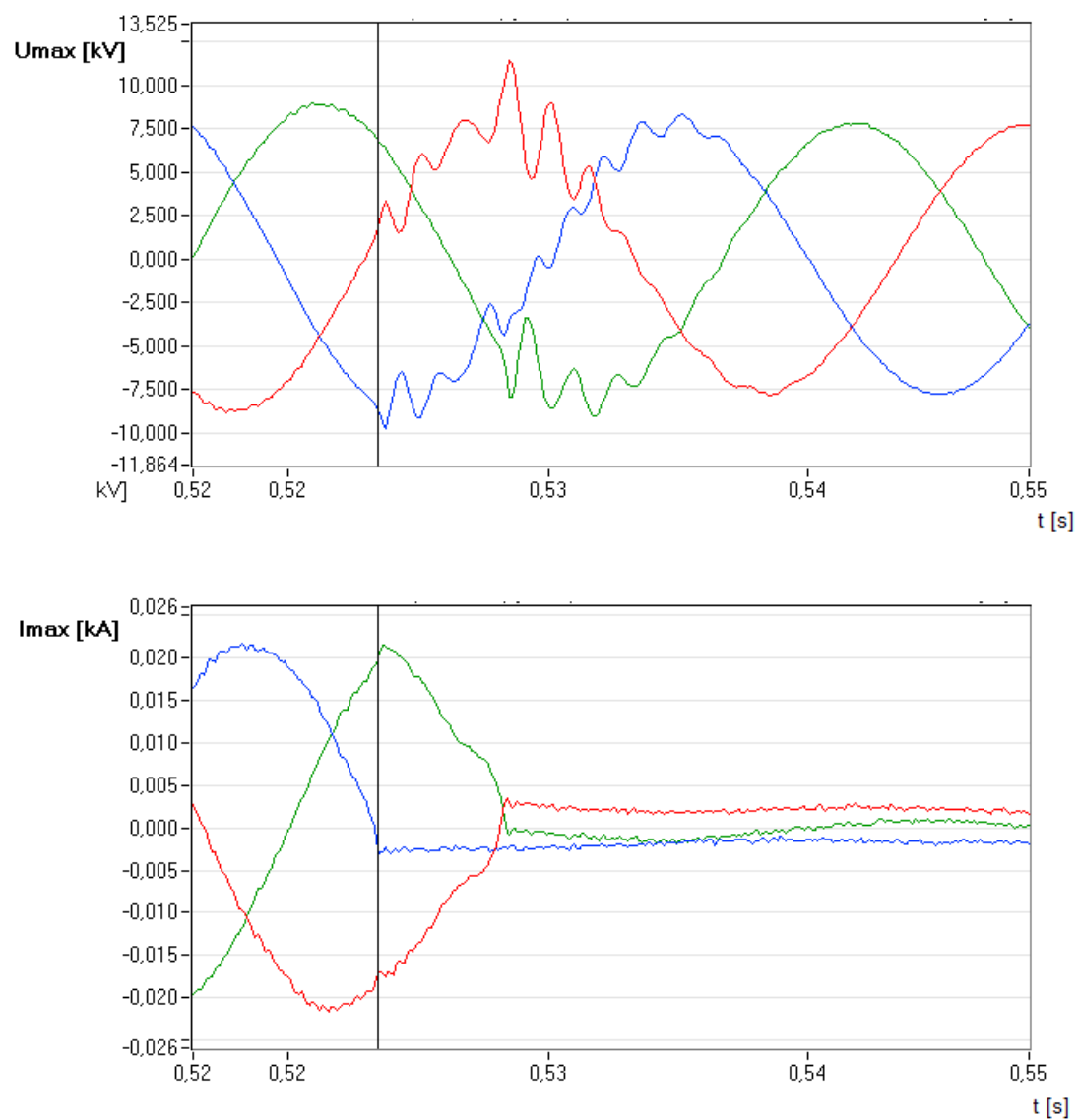
Obr. 7.3.2a - vypínání motoru pomocí vakuového vypínače bez ošetření přepětí RC členem

- **Motor 1N4 355 L-4 (firemní ozn. 1289.3) máloolejový vypínač HG4, bez RC členu**



Obr. 7.3.2b - vypínání motoru pomocí máloolejového vypínače bez ošetření přepětí RC členem

- **Motor 1N4 355 X-4 (firemní ozn. 1289.2) vakuový vypínač VM1, RC člen**



Obr. 7.3.2c - vypínání motoru pomocí vakuového vypínače s ošetřením spínacích přepětí RC členem

7.3.3 Výsledky měření spínacích přepětí na R61

I když byly hodnoty maximálních napětí a proudů při vypínacích procesech brány pouze ze strany sítě, tak z výše uvedených grafů lze konstatovat, že při vypínání induktivních proudů vakuovými vypínači je nasazení přepětových ochran na vývodových polích vn motorů na ÚK zcela opodstatněné.

Na prvních grafech na Obr. 7.3.2a u vypínání motoru vakuovým vypínačem bez ošetření spínacích přepětí RC členem je situace nejhorší. Špičkové hodnoty přepětí zde dosahují hodnot $U_{1\max} = 13,9\text{ kV} \rightarrow U_{1\text{ ef}} = 9,8\text{ kV}$ a $U_{2\max} = 12,9\text{ kV} \rightarrow U_{2\text{ ef}} = 9,1\text{ kV}$ s vysokými frekvencemi vlastních oscilací.

V druhém případě zobrazeném na grafech Obr. 7.3.2b u vypínání motoru máloolejovým vypínačem bez RC členu je situace nejpříznivější. Ani při chybějící přepětové ochraně nedosahuje maximální amplituda zotaveného napětí hranic větších než $U_{\max} = 9,3\text{ kV} \rightarrow U_{\text{ef}} = 6,6\text{ kV}$. To je samozřejmě způsobeno jinou konstrukcí a jiným principem zhášení oblouku u máloolejových vypínačů. Podobně jako u měření prvního, má naměřené zotavené napětí opět vyšší frekvenci vlastních oscilací.

U posledního měření při vypínání vakuovým vypínačem s instalovaným RC členem na motorovém vývodu, je vidět zřetelný rozdíl mezi výslednými hodnotami z prvního měření bez RC členu. U posledně uvedeného měření viz. Obr. 7.3.2c se podařilo zjistit, že špičková hodnota přepětí se podařila pomocí RC členu snížit na hodnotu $U_{\max} = 11,2\text{ kV} \rightarrow U_{\text{ef}} = 7,92\text{ kV}$. Max. amplituda napětí je tedy při použití RC členu o 2,7 kV nižší než bez použití RC členu. Na grafu průběhů napětí lze také vidět silný útlum vlastních oscilací zotaveného napětí.

Na všech třech grafech lze také upozorovat, jak vypínače provádí tzv. odseknutí vypínaných induktivních proudů motorů těsně pod hranicí 5 A před jejich průchodem přirozenou nulou, viz. kap. 7.1.3.

Závěr

Cílem práce bylo navrzení částečné modernizace el. ochran pro rozvodnu R22 kV a s tím musel být zpracován i související výpočet aktuálních zkratových poměrů pro tuto rozvodnu. V poslední části diplomové práce jsem navíc rozebíral problematiku vznikajících spínacích přepětí na kabelových vývodech motorů v rozváděči R61.

V první kapitole jsou v úvodu popsány možné poruchové stavy, které mohou vzniknout v ES a jejich vliv na el. zař. Další část je pak věnována základním pojmům z teorie ochran, kde je hned z kraje popsáno, co si představit pod pojmem ochrana a chráněný objekt. Dále je provedeno rozřídění ochran, jsou uvedeny základní požadavky na ochrany, jako je spolehlivost funkce, rychlost, citlivost, selektivita a další jiné požadavky. Jsou zde také uvedeny a popsány základní členy ochran a uvedeny informace a technická data pro výběr ochrany a výpočet jejího nastavení. Poslední část této kapitoly je věnována teoretickému rozboru ochran asynchronních motorů vn a transformátorů vn.

V druhé kapitole je uveden teoretický rozbor výpočtu zkratových poměrů dle ČSN 60 909-0, což znamená, že jsou zde uvedeny předpoklady pro správný postup při výpočtu maximálních i minimálních zkratových proudů, které je nutné znát pro dimenzování el. zařízení, pro kontrolu el. zařízení na dovolené oteplení při zkratu a v neposlední řadě také pro správné nastavení některých funkcí nadproudových ochran. V kapitole jsou přehledně uvedeny i postupy pro výpočty zkratových impedancí jednotlivých el. zař.

Třetí kapitola je zaměřena na popis napájení rozvodny R22 kV na ÚK a na popis současného stavu chránění vč. obecného popisu výzbroje rozváděčových skříní na rozvodně R22 kV .

Ve čtvrté kapitole jsou uvedena důležitá technická data nutná k výpočtům zkratových poměrů a k výpočtům nastavení jednotlivých ochranných funkcí nově navržených el. ochran. Jedná se např. o parametry zkratových poměrů nadřazené rozvodny, parametry výzbroje a současného nastavení ochran rozváděčových skříní, jenž jsou mimo jiné nutné i z důvodu nastavení a kontroly selektivity původních a nově navržených ochran. Jsou zde uvedeny i parametry stávajících PTP, PTN, dále pak typy kabelů na jednotlivých vývodech a jejich délky.

Pátá kapitola je věnována výpočtu zkratových poměrů na rozvodně R22 kV . Pro přehlednost diplomové práce a samotného výpočtu jsem musel jako první krok volit překreslení původního tuží nakresleného schématu napájení UK do nového přehledného schématu, viz. příloha č.1. Mimo to jsem poté celkové přehledové schéma překreslil do podoby zjednodušeného přehledového schéma na Obr. č.5 (nebo také příloha č.2), z kterého jsem vycházel při sestavování jednotlivých náhradních schémat pro výpočty zkratových proudů. Celý výpočet zkratových poměrů jsem pak realizoval za pomoci programu excel. Aktualizaci zkratových poměrů bylo nutno provést z důvodu zastaralých původních údajů o zkratových poměrech, které byly prováděny podle starších již neplatných norem. Původní údaje byly např. počítány bez příspěvků asynchronních motorů, což vede k dosti velkým rozdílům zkratových poměrů na přípojnicích 6 kV v rozváděči R61, což je vidět v tabulce uvedené na další straně (tab. původně a nově stanovených zkratových poměrů pro rozvodnu R22 kV , resp. i R61 6 kV).

Zkratové poměry na R 22 kV		
Zkratový proud	Původní hodnoty [kA]	Aktuální hodnoty [kA]
I''_{k3max}	15,237	13,950
i_{p3}	34,374	32,860
$I_{th}(1s)$	15,846	14,294
I''_{k2min}	Nestanoveno	5,554
Zkratový výkon	Původní hodnota [MVA]	Aktuální hodnota [MVA]
S''_{k3}	606,28	555,7

Tabulka - původní a aktuální zkratové poměry na rozvodně R22 kV

Zkratové poměry na R 22 kV – rozváděč R61 6 kV		
Zkratový proud	Původní hodnoty [kA]	Aktuální hodnoty [kA]
I''_{k3max}	11,348	22,189
i_{p3}	27,201	51,650
$I_{th}(1s)$	11,688	22,737
$I_{th}(0,1s)$	Nestanoveno	24,306
I''_{k2min}	Nestanoveno	7,251
Zkratový výkon	Původní hodnoty [MVA]	Aktuální hodnoty [MVA]
S''_{k3}	123,681	242,1

Tabulka - původní a aktuální zkratové poměry na rozvodně R22 kV – rozváděč R61 6 kV

Aktualizovaných údajů zkratových poměrů jsem poté využil v šesté kapitole při výpočtech nastavení některých nadproudových funkcí nově navržených digitálních ochran.

V šesté kapitole jsem se zabýval návrhem nových elektrických ochran pro hlavní transformátory T7 a T8 (o stejných parametrech) a návrhem ochran pro vývodová pole motorů v R61 6 kV. Pro kompletní účely chránění transformátorů jsem volil výběr terminálů chránění transformátoru RET 543 a pro účely chránění vývodových polí motorů, jsem volil ochranný terminál REF 542plus, který nad rámec standardních proudových, napěťových a ostatních ochranných funkcí, je vybaven důležitými ochrannými funkcemi pro chránění motorů, tj. tepelná funkce ochrany motoru (tepelný model), ochrana počtu startů motoru, ochranná funkce při zablokovaném rotoru a ochrana rozběhu motoru. Výpočet nastavení vyjmenovaných ochranných funkcí pro motory jsem provedl dle technické dokumentace [14]. Kromě nastavení těchto vyjmenovaných funkcí pro chránění motorů, jsem provedl i výpočet nastavení nadproudových funkcí obou terminálů chránící el. zařízení proti nadproudům a zkratům vč. kontroly kabelů na dovolené oteplení při zkratu. U terminálu RET 543 jsem podle doporučení z technické dokumentace [11] provedl nastavení diferenciální ochrany pro výše zmíněné transformátory. Výsledky navrhovaného nastavení s dodržáním časové selektivity ochran na R22 kV, jsou uvedeny v přehledné tabulce na další stránce spolu s tabulkou nastavení ochran na hlavní rozvodně HR 110 / 22 / 6 kV.

Tabulka nastavení nadproudových ochran na HR 110 / 22 / 6 kV		
Pole č.	Typ ochrany / pozn.	Aktuální nastavení ochranných funkcí
1., 26.	REF 543	I > nastaveno 1000 A / k = 0,8 Long Time Inversion
	T 101, T102	I >> signalizuje 1000 A / 12 s
	strana 22 kV	I >>> nastaveno 2875 A / 2,1 s
11., 22.	REF 543	I > nastaveno 750 A / k = 0,6 Long Time Inversion
	REF 630	I >> nastaveno 2250 A / 1,6 s
	Kabelové vývody pro R22 kV	

Tabulka – nastavení nadproudových ochran na HR 110 / 22 / 6 kV

Tabulka nastavení nadproudových funkcí ochran na R22 kV		
Pole č.	Typ ochrany / pozn.	Aktuální nastavení ochranných funkcí
1., 2.	SPAJ 140 C	I > nastaveno 525 A / k = 0,6 Long Time Inversion
	přívody z HR22 kV	I >> nastaveno 2250 A / 1,4 s
10., 11.	RET 543	I > nastaveno 300 A / k = 0,8 Long Time Inversion
	Vývody pro T7, T8	I >> signalizuje 276 A / 12 s
		I >>> nastaveno 4620 A / 1,2 s
		Nastavení diferenciální funkce ochrany transformátoru Diff6T viz. kap. 6.2.3
Nastavení nadproudových funkcí ochran na R22 kV – rozváděč R61 6 kV		
1., 57.	RET 543	I > nastaveno 1060 A / k = 0,8 Long Time Inversion
	Přívody z T7, T8	I >>> nastaveno 6000 A / 1,1 s
15., 19., 21., 16.	REF 542plus	I >>> nastaveno 315 A / 0,015 s
	Kabelové vývody pro motory vývěv I. linky	funkce vypíná zkrat
		Nastavení motorových funkcí viz. kap. 6.3.2 - výpočet nastavení terminálu REF 542plus

Tabulka – nastavení nadproudových ochran na R22 kV a R61 6 kV

V sedmé kapitole jsem chtěl poukázat na velký problém dnešní doby, který v některých případech nastává při nasazení vakuových vypínačů do rozvodů vysokého napětí. Proto jsem se

věnoval problematice vzniku a možným ochranám proti spínacím přepětím, která vznikají při vypínání induktivních proudů motorů vn vakuovými vypínači v rozváděči R61 6 kV. Jako první jsem se snažil o vysvětlení vzniku spínacích přepětí při těchto úkonech u odpojování induktivní zátěže, který je v poslední době celosvětově spjat s pojmem přechodného zotaveného napětí tzv. transient recovery voltage, nebo-li „TRV“. Vysvětlení vzniku těchto spínacích přepětí („TRV“) jsem provedl analogicky s vypínáním malých induktivních proudů [2], a také jsem využil poznatků a zkušeností uvedených v [15]. V další části zabývající se ochranou před těmito spínacími přepětími, jsem uvedl možné způsoby, jakými se dají právě tato spínací přepětí omezit. V poslední části této kapitoly jsem popsal měření a zhodnotil výsledky z tohoto měření spínacích přepětí, které jsme na ÚK na rozvodně R22 kV – rozváděči R61 provedli, za účelem porovnání špičkových hodnot právě těchto spínacích přepětí, které na R61 nastávají. Měření se uskutečnilo ve třech variantách podle způsobu vypínání a to: vakuovým vypínačem bez RC členu, vypínáním vakuovým vypínačem s RC členem a vypínáním máloolejového vypínače bez RC členu. Z výsledků měření lze tvrdit, že při vypínání induktivních proudů motorů 6 kV na I. lince vývěv vakuovými vypínači, k těmto přepětím opravdu dochází, a pokud není do vývodového pole nainstalována přepětěová ochrana, dosahují přepětěové špičky na straně sítě (zdroje) značných hodnot $U_{1\max} = 13,9 \text{ kV} \rightarrow U_{1\text{ef}} = 9,8 \text{ kV}$ a $U_{2\max} = 12,9 \text{ kV} \rightarrow U_{2\text{ef}} = 9,1 \text{ kV}$ s vysokými frekvencemi vlastních oscilací. Na straně motoru dosahují tato přepětí ještě větších hodnot, z důvodů popsaných v samotné kapitole. Jelikož nebylo v mých možnostech provést měření i na straně vypínaného motoru, čerpal jsem z výsledků experimentálního měření firmy Tavrida Electric uvedeného v [15], viz. tabulka jako příloha č.5. diplomové práce, kde můžete vidět, že přechodné zotavené napětí „TRV“ na straně motoru opravdu dosahují větších hodnot než na straně sítě.

Na závěr bych chtěl říci, že na ÚK bychom se chtěli s pracovníky elektro-údržby tímto tématem vzniku přechodných zotavených napětí „TRV“ při vypínání induktivních proudů motorů dále zabývat a v budoucnu zajistit provedení měření spínacích přepětí i na straně motorů. Výsledků z tohoto měření by se dalo využít dále, při numerických výpočtech návrhu RC členu s nasimulováním vypínání obvodů motorů v programu EMTP. Podle výstupů z tohoto programu se poté rozhodnout pro správný návrh hodnot RC členu pro ostatní vývodová pole v R61. K výše uvedenému by nám částečně dopomohla i mnou navrhovaná rekonstrukce el. ochran, kde by se dalo využít měřících funkcí těchto moderních terminálů k záznamům přechodných dějů a k jejich následné analýze. Pokud by, alespoň k částečné rekonstrukci ochran na rozvodně R22 kV v dohledné době došlo, musela by se provést kontrola vhodnosti stávajících PTP pro nové ochranné terminály, která nebyla součástí diplomové práce. Vhodné by pak bylo i doplnění, alespoň některých z problémových vývodových polí motorů o přístrojové transformátory napětí k možnosti sledování těchto přechodných dějů.

Diplomová práce splnila má očekávání a obohatila mě o množství nových poznatků, které bych chtěl dále využít v praxi. Doufám, že tato práce bude zároveň i podkladem úseku elektro-údržby na ÚK, který poslouží k dalším investičním záměrům pro modernizaci systému chránění v rozvodnách ÚK na lokalitě Dolu Darkov.

Literatura

- [1] Grym R., Hochman P., Berman J., Machoň J., Cichoň B. (2004). *Chránění II*. Havířov: IRIS.
- [2] Hasman T. (2004). *Přepětí v elektroenergetických soustavách*. Praha: ČVUT.
- [3] Tlustý J., Kyncl J., Musil L., Špetlík J., Švec J., Hamouz P., Müller Z., Müller M.. (2011). *Monitorování, řízení a chránění elektrizační soustavy*. Praha: ČVUT.
- [4] Norma ČSN EN 60 909-0 (33 3022): *Zkratové proudy v trojfázových střídavých soustavách – část 0: Výpočet proudů*.
- [5] Norma ČSN 33 3051: *Ochrany elektrických strojů a rozvodných zařízení*. Listopad 1992.
- [6] Janíček F.. (2004). *Digitálne ochrany v elektrizačnej sústave*. Bratislava: STU.
- [7] Haluzík E., Weidinger L., Krátký M. *Ochrany a jištění energetických zařízení*. Brno: Skripta VUT
- [8] Bakalářská práce - *Zkrat v trojfázových soustavách*. Martin Šmída.
- [9] Podniková norma PNE 38 4065 (3.vydání, 2008): *Provoz, navrhování a zkoušení ochrany a automatik*.
- [10] ABB Terminál transformátoru RET 54_: *Popis a technická data*. Listopad 2010.
- [11] ABB Differential Protection RET 54_/Diff6T function: *Application and Setting Guide*. Srpen 2005.
- [12] Norma ČSN 33 2000-5-523: *Elektrické instalace budov - Část 5: Výběr a stavba elektrických zařízení - Oddíl 523: Dovolené proudy v elektrických rozvodech*. 1994.
- [13] ABB dokumentace. *Feeder terminal REF 542plus: Product guide*. July 2010.
- [14] ABB dokumentace. *Feeder terminal REF 542plus: Motor protection with ATEX - certification. User guide*. December 2009.
- [15] Dullni E. (ABB), Dr. Taylor E. (Siemens), Dr. Chaly E. (Tavrida Electric). *Prezentační materiál z mezinárodního sympózia o výbojích a elektrické pevnosti ve vakuu (ISDEIV Tomsk in Russia 2012)*. Září 2012.
http://www.hcei.tsc.ru/conf/isdeiv/images/presentations/0_Panel_I_ISDEIV2012.pdf
- [16] ABB dokumentace. *Low/mid duty VM1 - Vakuové vypínače vn s magnetickým pohonem*. Únor 2008.
[https://abblibrary.s3.amazonaws.com/public/2f19f5d6bac31c7ac12573e7003525f8/CA_VM1\(CS\)F_1VLC000157.pdf?filename=CA_VM1\(CS\)F_1VLC000157.pdf](https://abblibrary.s3.amazonaws.com/public/2f19f5d6bac31c7ac12573e7003525f8/CA_VM1(CS)F_1VLC000157.pdf?filename=CA_VM1(CS)F_1VLC000157.pdf)
- [17] ELCOM dokumentace. *Sdružený analyzátor sítí BK-ELCOM typ ENA330: Charakteristika výrobku a technické parametry*.
<http://www.elcom.cz/cz/ke-stazeni/merici-systemy/testandmeasurement-cz/system-monitoringu-a-analyzy-kvality-elektřiny-bk-elcom-katalogove-listy/ena330-kompaktni-prenosny-pristroj/stahnout>

Příloha č.3

V následujících tabulkách jsou uvedeny technické údaje funkčních bloků použitých ochranných funkcí terminálu RET 543 potřebných při návrhu modernizace systému chránění.

Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti NOC3Low, 3I>

Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, stupeň s nižším rozsahem seřiditelnosti NOC3Low, 3I>		
Popudový proud		0.10...5.00 × I _n
Čas působení v režimu DT (nezávislé zpoždění)		0.05...300.00 s
Násobící časový faktor v režimu IDMT (závislé zpoždění)		0.05...1.00
Provozní režim	(Not in use)	Nevyužito
	(Definite time)	Nezávislé časové zpoždění
	(Extremely inverse)	Extrémně závislá charakteristika
	(Very inverse)	Velmi závislá charakteristika
	(Normal inverse)	Normálně závislá charakteristika
	(Long time inverse)	Dlouhodobě závislá charakteristika
	(RI-type inverse)	Závislá charakteristika – typ RI
	(RD-type inverse)	Závislá charakteristika – typ RD
	(IEEE curves)	IEEE charakteristiky
Režim měření	(Peak-to-peak)	Špička – špička
	(Fundamental frequency)	Základní frekvence
Čas odpadu/návratu čítače času působení		0...1000 ms
Přesnost hodnoty působení		Upozornění! Níže uvedené hodnoty jsou platné v rozsahu f/f _n = 0,95...1,05 ±2,5 % z nastavené hodnoty nebo ±0,01 × I _n
Čas popudu:		
– injektované proudy		>2,0 × popudový proud:
– interní čas		<32 ms
– celkový čas		<40 ms
Čas resetu		40...1000 ms (závislé na minimální šířce impulsu nastavené u výstupu působení)
Typický přídržný poměr		0,95
Čas zpoždění návratu funkce		<45 ms
Přesnost času působení v režimu DT (nezávislé zpoždění)		±2 % z nastavené hodnoty nebo ±20 ms
Třída přesnosti/index E v režimu IDMT (závislé zpoždění)		Index třídy E = 5,0 nebo ±20 ms

Tabulka 1 – Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, NOC3Low, 3I>

Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti NOC3High, 3I>> a mžikový stupeň NOC3Inst, 3>>>

Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, stupeň s vyšším rozsahem seřiditelnosti NOC3High, 3I>> a mžikový stupeň NOC3Inst, 3>>>		
Popudový proud		0.10...40.00 × I _n
Čas působení		0.05...300.00 s
Provozní režim	(Not in use)	Nevyužito
	(Definite time)	Nezávislé časové zpoždění
	(Instantaneous)	Mžikové působení
Režim měření	(Peak-to-peak)	Špička – špička
	(Fundamental frequency)	Základní frekvence
Čas odpadu/návratu čítače času působení		0...1000 ms
Přesnost hodnoty působení		Upozornění! Níže uvedené hodnoty jsou platné v rozsahu f/f _n = 0,95...1,05 0,1...10 × I _n : ±2,5 % z nastavené hodn. nebo ±0,01 × I _n 10...40 × I _n : ±5,0 % z nastavené hodnoty
Čas popudu:		
– injektované proudy		>2,0 × popudový proud:
– interní čas		<32 ms
– celkový čas		<40 ms
Čas resetu		40...1000 ms (závislé na minimální šířce impulsu nastavené u výstupu působení)
Typický přídržný poměr		0,95
Čas zpoždění návratu funkce		<45 ms
Přesnost času působení v režimu DT (nezávislé zpoždění)		±2 % z nastavené hodnoty nebo ±20 ms

Tabulka 2 - Třífázová nesměrová nadproudová ochrana, NOC3High, 3I>> a NOC3Inst, 3>>>

Stabilizovaná a mžiková diferenciální ochrana transformátorů Diff6T, 3ΔI>, 3ΔI>>

Stabilizovaná a mžiková diferenciální ochrana transformátorů Diff6T, 3ΔI>, 3ΔI>>	
Základní nastavení; nejmenší poměr diferenciálního a jmenovitého proudu, který aktivuje vypnutí	5...50 %
Popudový poměr; sklon přímky 2. části vypínací charakteristiky	10...50 %
Bod zlomu 1; bod zlomu mezi 1. a 2. částí vyp. charakteristiky	$0.5 \times I_n$
Bod zlomu 2; bod zlomu mezi 2. a 3. částí vyp. charakteristiky	$1.0...3.0 \times I_n$
Vypínací hodnota mžikového stupně	$5...30 \times I_n$
Přesnost hodnoty působení	Upozornění! Níže uvedené hodnoty jsou platné v rozsahu $f/f_n = 0.95...1.05$ Měření fázové difference: $\pm 4^\circ$ Stabilizovaný stupeň: $\pm 4\%$ z nast. hodnoty nebo $\pm 2\% \times I_n$ Mžikový stupeň: $\pm 4\%$ z nast. hodnoty nebo $\pm 2\% \times I_n$
Vypínací čas: – Injektované proudy – interní čas – celkový čas Čas resetu	$> 2.0 \times$ vypínací proud <32 ms <45 ms 60...1020 ms (závislé na minimální šířce impulsu nastavené u výstupu působení)
Typický přídržný poměr Čas zpoždění	0,98 <40 ms

Tabulka 3 – Stabilizovaná a mžiková diferenciální ochrana Diff6T, 3ΔI>, 3ΔI>>

Příloha č.4

V následujících tabulkách jsou uvedeny technické údaje funkčních bloků použitých ochranných funkcí terminálu REF 542plus potřebných při návrhu modernizace systému chránění.

Třífázové nesměrové nadproudové funkce terminálu REF 542plus

Current protection functions		
68	Inrush stabilization (Only in connection with 50 and 51)	N = 2.0 - 8.0 M = 3.0 - 4.0 Time = 200 - 100 000 ms
68	Inrush harmonic	Minimum current threshold = $0.05 - 40.00 \times I_n$ Fault current threshold = $0.05 - 40.00 \times I_n$ Harmonic ratio threshold = 5 - 50%
50	Overcurrent instantaneous	$I_{>>>} = 0.100 - 40.000 \times I_n$ $t = 15 - 30\ 000\ ms$
51	Overcurrent high	$I_{>>} = 0.05 - 40.00 \times I_n$ $t = 20 - 300\ 000\ ms$
51	Overcurrent low	$I_{>} = 0.05 - 40.00 \times I_n$ $t = 20 - 300\ 000\ ms$
51 IDMT	Overcurrent IDMT (Inverse Definite Minimum Time)	Inverse time characteristics: Normal, Very, Extreme and Long-time inverse $I_e = 0.050 - 40.000 \times I_n$ K = 0.050 - 1.500
50/51	Overcurrent with free programmable characteristic (8 thresholds available)	$I_s = 0.05 - 40.000 \times I_n$ $t\ (def) = 0.015 - 300.000\ s$ A = 0.005 - 200.000 P = 0.005 - 3.000 B = 0.000 - 50.000 s Td = 0.050 - 5.000 Tr = 0.020 - 100.000 s
67	Overcurrent directional high	$I_{>>} = 0.050 - 40.000 \times I_n$ $t = 40 - 30\ 000\ ms$ Direction = backward, forward

Tabulka 4 – Třífázové nesměrové nadproudové funkce ochrany

Motorové ochranné funkce terminálu REF 542plus

Motor protection functions		
49	Thermal overload protection with total memory	Nominal temperature = 50 - 400°C (nominal temperature at I_n) Nominal current (I_{Mn}) = $0.100 - 5.000 \times I_n$ (primary value of the nominal motor current) Initial temperature = 10 - 400°C Time constant at $I < 0.1 \times I_{Mn}$ = 10 - 100 000 s Time constant at $0.1 \times I_{Mn} < I < 2 \times I_{Mn}$ = 10 - 20 000 s Time constant at $I > 2 \times I_{Mn}$ = 10 - 20 000 s Trip Temperature = 50 - 400°C Warning temperature = 50 - 400°C Environmental temperature = 10 - 50°C Reset temperature = 10 - 400°C
51	MS Motor start	$I_{Mn} = 0.200 - 2.000 \times I_n$ (motor current) $I_s = 1.000 - 20.000 \times I_{Mn}$ (start value) $t = 40 - 30\ 000\ ms$ $I_{>} = 0.200 - 0.800 \times I_s$ (motor start)
51	LR Locked rotor (definite time characteristic)	$I_{Mn} = 0.200 - 2.000 \times I_n$ (motor current) $I_s = 1.000 - 20.000 \times I_{Mn}$ (start value) $t = 40 - 30\ 000\ ms$
66	Number of starts	n (warm) = 1 - 10 (number of warm starts) n (cold) = 1 - 10 (number of cold starts) $t = 1.00 - 7200.00\ s$ T (warm) = 20 - 200°C (warm start temperature threshold)
46	Unbalance load	$I_s = 0.05 - 0.30 \times I_n$ (start value of the negative phase sequence) K = 0.5 - 30.0 $t_{Reset} = 0 - 2000\ s$ Timer decreasing rate = 0 - 100%
37	Low load	$P_n = 50 - 100\ 000\ kW$ (primary values) Minimal load P = 5 - 00% $\times P_n$ Minimal current I = 2 - 20 % $\times I_n$ Operation time = 1.0 - 1000.0 s

Tabulka 5 – Motorové ochranné funkce terminálu REF 542plus

Příloha č.5

Výsledky experimentálního měření vypínání indukčního proudu třemi vakuovými a jedním máloolejovým vypínačem [15]. Výsledky jsou uvedeny jak pro stranu sítě, tak i pro stranu motoru.

If we lined up maximum (*maximum maximoro*) overvoltages recorded for each CB at these ten closing operations, we would get the following:

Circuit breaker	Maximum overvoltage on the source side, kV	Maximum overvoltage on the motor side (all oscillograms), kV	Maximum overvoltage on the motor side (noise-free oscillograms), kV
VCB1	10,6	17	12,3
VCB2	9,2	13,3	13,3
VCB3	13,3	21,2	NA
OCB	10,0	19,6	NA

Excellence in engineering

 TAVRIDA ELECTRIC

Tab. 6 - Výsledky experimentálního měření vypínání indukčního proudu vn motorů [15]